



Gonçalo Coelho Oliveira Teotónio

Licenciado em Ciências de Engenharia Civil

Consolidação de arenitos brandos utilizados em construções antigas. Exemplo de aplicação.

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil de Construção

Orientador: Professor Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas,
DCT, FCT-UNL

Coorientador: Professor Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho,
DEC, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Armando Manuel Sequeira Nunes Antão

Arguente: Prof. Doutor Luis Gonçalo Correia Baltazar

Vogal: Prof. Doutor Pedro Calé da Cunha Lamas



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Março de 2018

Consolidação de arenitos brandos utilizados em construções antigas. Exemplo de aplicação.

Copyright © - Gonçalo Coelho Oliveira Teotónio, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

Concluída a presente dissertação, gostaria de deixar o meu agradecimento a todos os que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento desta, graças à sua disponibilidade, apoio e motivação durante o decorrer desta etapa final.

Em primeiro lugar, quero agradecer ao Professor Doutor Pedro Lamas, orientador em todo o sentido da palavra, pelo seu incansável contributo, disponibilidade, pelos conhecimentos transmitidos, pelo rigor exigido e pela forma entusiasmante que partilha todas as suas histórias e vivências.

Ao Professor Doutor Fernando Pinho, co-orientador desta dissertação, pela disponibilidade, pelo rigor e exigência e principalmente pela compreensão e motivação transmitida.

Ao Engenheiro Vítor Silva pela disponibilidade e acompanhamento durante a realização da campanha experimental, pelos conselhos, ensinamentos transmitidos e esclarecimento de dúvidas.

Ao Departamento de Conservação da Natureza e Florestas do Algarve do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, I.P., em especial à Diretora Valentina Coelho Calixto pela autorização concedida e à Dra. Deolinda Tavares pelo acompanhamento e disponibilidade no campo.

Ao Engº Erik Ulrix pela disponibilidade, transmissão de conhecimentos e cedência de produto consolidante utilizado na campanha experimental.

Ao Engº Carlos Pina dos Santos, investigador principal do LNEC, pela autorização em disponibilizar equipamento científico para o desenvolvimento de um ensaio experimental.

À minha mãe Clara, obrigado por seres a minha inspiração e pelo apoio que me proporcionaste para alcançar os meus objetivos. Ao meu irmão, obrigado por estares presente e por toda a ajuda durante os momentos em que estive ausente. Peço-vos desculpa pela falta de paciência durante esta fase.

Ao grupo ‘SAL’, obrigado pela amizade e por manterem unidos estes laços durante todos estes anos. Todos de forma direta ou indireta contribuíram para o meu bem-estar.

Aos meus colegas da faculdade, João, Diogo e Tozé, obrigado por manterem este grupo vivo e por toda a amizade e companheirismo aos longo destes anos.

Ao meu grupo da *Sacoor Brothers*, obrigado pela motivação, pelo carinho e pela amizade que me transmitiram desde que entrei na loja e pelo grupo fantástico que se criou ao longo deste tempo.

A todas as pessoas que fizeram/fazem parte da minha vida e que em algum momento durante esta longa caminhada me apoiaram e incentivaram, o meu mais sincero agradecimento.

Por fim, agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologias e em especial a todos os docentes do Departamento de Engenharia Civil pela transmissão de conhecimentos e por contribuírem para a minha formação académica.

Resumo

A aplicação de consolidantes em pedra natural utilizada em construções antigas permite a recuperação da sua coesão interna. Na verdade, e segundo alguns autores, este processo tem possibilitado não só restituir as condições que outrora o material já tivera, como ainda aumentar significativamente as suas características mecânicas originais.

Na presente dissertação descrevem-se os trabalhos de campo e laboratório necessários à caracterização de um arenito natural muito poroso utilizado na construção de um forte costeiro com mais de trezentos anos, localizado na Praia do Pessegueiro, Sines. Este está classificado de Imóvel de Interesse Público e, dada a sua localização num ambiente particularmente agressivo, tem sofrido intensa degradação. No decorrer das últimas décadas o forte foi sujeito a diversas intervenções de reabilitação, algumas das quais revelaram-se pouco apropriadas do ponto de vista estético, nomeadamente as que incluíram substituição de elementos estruturais de material lítico diferente tanto em termos visuais como físico-mecânicos.

Um número considerado representativo de provetes foi obtido de amostras recolhidas de estruturas anexas ao forte, tendo uma parte sido sujeita a um processo de consolidação recorrendo a um silicato de etilo comercial. Todos os provetes foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos com o objetivo de verificar a ação do consolidante utilizado na conservação.

Por fim, os trabalhos realizados permitiram evidenciar a eficácia do tratamento de consolidação no reforço da resistência mecânica do arenito.

Palavras-chave: Forte costeiro, arenito, propriedades físicas e mecânicas, reforço, consolidação, silicatos de etilo

Abstract

The application of consolidants on natural stone used in ancient buildings allows the recovery of its internal cohesion. In fact, according to some authors, this treatment application has made it possible not only to restore the conditions that the material already had, but to also significantly increase its original mechanical characteristics.

This thesis describes the *in-situ* and laboratory work required to characterize a very porous natural sandstone used in the construction of a coastal fortress with more than three hundred years, located at Pessegueiro's Beach, Sines. This historical building is classified as property of public interest and given its location in an aggressive environment, has suffered intense weathering. During the last decades the fort was subject to several rehabilitation interventions, some of which proved to be less appropriate from the aesthetic point of view, namely those that included replacement of structural elements of different lytic material in both visual and physical-mechanical terms.

A representative number of specimens were obtained from samples collected around the fortress walls, a part been subject to a consolidation treatment procedure using a commercial ethyl silicate. All the specimens were submitted to physical and mechanical tests with the purpose of assessing the potential effectiveness of the consolidant used in their reinforcement.

Finally, this study showed the effectiveness of the consolidation treatment in reinforcing the mechanical strength of the sandstone.

Keywords: Coastal fort, sandstone, physical and mechanical properties, reinforcement, consolidation, ethyl silicates

Capítulo 1 - Introdução

1.1	Considerações iniciais	1
1.2	Objetivos e metodologia.....	1
1.3	Organização da dissertação	2

2 Capítulo 2 - Estudos sobre arenitos

2.1	Considerações iniciais	5
2.2	Os arenitos como material de construção no património edificado	5
2.2.1	Património nacional e mundial edificado em arenito	5
2.2.2	Características mecânicas e físicas associadas aos arenitos	9
2.2.3	Mecanismos de degradação dos arenitos	10
2.3	Conservação e consolidação de arenitos	13
2.3.1	A evolução do uso dos consolidantes	14
2.3.2	Formulação química de silicatos de etilo	17
2.3.3	Formulação comercial do silicato de etilo	18
2.3.4	Métodos de aplicação do consolidante	19
2.3.5	A introdução de resinas sintéticas como aditivo a consolidantes	20

3 Capítulo 3 - Caso de estudo: O forte da Praia do Pessegueiro

3.1	Considerações iniciais	25
3.2	Enquadramento geológico	25
3.3	Enquadramento climático	28
3.4	Historial do Forte da Praia do Pessegueiro como edifício patrimonial	35
3.5	Estado atual de conservação do forte da Praia do Pessegueiro	37
3.5.1	Preocupações éticas na conservação de edifícios	37
3.5.2	Historial de intervenções de conservação realizadas no local de estudo	38
3.5.3	Mecanismos de degradação observados	40
3.6	Considerações finais	44

4 Capítulo 4 - Procedimentos experimentais

4.1	Considerações iniciais	47
4.2	Recolha e preparação das amostras	48

4.3	Sistema de classificação dos provetes	51
4.4	Aplicação do consolidante	54
4.4.1	Consolidação por absorção por capilaridade.....	55
4.4.2	Consolidação através de pincelagem	57
4.4.3	Observação visual e variação de massa	57
4.5	Procedimentos dos ensaios de caracterização realizados	60
4.5.1	Ensaio de caracterização in-situ	60
4.5.2	Ensaio de caracterização realizados em laboratório	63
5	Capítulo 5 - Análise e discussão dos resultados	
5.1	Considerações gerais	81
5.2	Provetes prismáticos e cilíndricos	81
5.2.1	Massa volúmica aparente e porosidade aberta	81
5.2.2	Permeabilidade ao vapor de água.....	82
5.2.3	Absorção de água por capilaridade	84
5.2.4	Ensaio de Secagem	86
5.2.5	Velocidade de propagação de ondas	90
5.2.6	Módulo de elasticidade dinâmico	92
5.2.7	Resistência à tração por flexão e resistência à compressão.....	93
6	Capítulo 6 - Conclusões	
6.1	Considerações iniciais	97
6.2	Proposta para desenvolvimentos futuros	99

Índice de figuras

Figura 2.1 - Igreja de S. Leonardo na Atouguia da Baleia, Peniche	5
Figura 2.2 – Exemplos de estruturas em Portugal construídas em arenito	6
Figura 2.3 - Exemplos de monumentos construídos em arenito.....	6
Figura 2.4 - Exemplos de monumentos em arenito no continente africano.....	7
Figura 2.5 - Exemplos de monumentos em arenito no continente asiático (Índia).....	7
Figura 2.6 - Exemplos de monumentos em arenito no continente asiático (Camboja).....	8
Figura 2.7 - Exemplos de monumentos em arenito no continente americano	8
Figura 2.8 – Evidências de desgaste de material arenítico	10
Figura 2.9 – Evidências da presença de líquenes num paramento arenítico	13
Figura 3.1 Vestígios da localização do eolianito ao longo do litoral alentejano.....	26
Figura 3.2 – Presença do eolianito nas imediações do forte	27
Figura 3.3 - Registos da temperatura (°C) referente ao período de 1971/2000.....	29
Figura 3.4 - Registos de precipitação (mm) referentes ao período 1971/2000	30
Figura 3.5 - Médias mensais de HR e evaporação.....	31
Figura 3.6 - Número médio mensal de dias com nevoeiro referentes ao período 1971-2000	31
Figura 3.7 - Registos da insolação referentes ao período 1971/2000.	32
Figura 3.8 - Registos da velocidade do vento (km/h) e das frequências (%) mensais e por rumos	33
Figura 3.9 - Mapa de localização com enquadramento geográfico da Central Termoelétrica, Refinaria de Sines e o Forte do Pessegueiro	34
Figura 3.10 - Vista aérea da Ilha do Pessegueiro.....	35
Figura 3.11 - Pormenores de zonas com pedra talhada	36
Figura 3.12 - Vista sudeste do Forte do Pessegueiro e respetiva planta esquemática	36
Figura 3.13 - Obras de contenção e reforço realizadas em 2008.	39
Figura 3.14 - Resultado das obras de tratamentos da entrada principal evidenciando as diferenças entre o paramento de arenito à vista e após ter sido rebocado	40
Figura 3.15 - Aspeto do paramento do baluarte virado a sudeste antes e após as obras de conservação....	40
Figura 3.16- Estado atual do reboco na entrada principal do forte com manifestações de colonizações biológicas através de fungos	41
Figura 3.17 - Aspeto do paramento virado ao mar com ascensão de água capilar com aparecimento de fungos e líquenes	41
Figura 3.18 - Paramentos da entrada principal e virado a norte com alteração de cor do reboco acompanhado de fissuração e aparecimento de manchas	42
Figura 3.19 - Evidências de intrusões biológicas num dos cunhais do forte	43
Figura 3.20 - Aspeto de alguns cunhais do forte com manifestações de alveolização e fenómenos de erosão.....	43
Figura 3.21 - Muro exterior do forte, virado ao mar com zonas esbranquiçadas	44

Figura 3.22 - Zona de escarpa e contra-escarpa com Fenómenos de alveolização na parede e na escada de acesso ao fosso.....	44
Figura 3.23 Pormenor do cordão do 2º piso em arenito e continuidade em pedra moca-creme	45
Figura 4.1 - Procedimento experimental adotado para obtenção dos provetes prismáticos e cilíndricos ...	48
Figura 4.2 - Efeitos da anisotropia em ensaios de compressão uniaxial em rochas.....	49
Figura 4.3 - Amostras no estado natural, após o primeiro corte	50
Figura 4.4 - Processo para obtenção dos provetes cilíndricos através de equipamento com caroteadora ..	50
Figura 4.5 - Provetes prismáticos e cilíndricos assinalados com a respetiva designação.	52
Figura 4.6 – Produto consolidante Tegovakon	54
Figura 4.7 - Processo de aplicação do consolidante	55
Figura 4.8 - Processo de consolidação dos provetes.....	56
Figura 4.9 - Formação de gel de sílica amorfa resultante da aplicação do consolidante após o processo de cura, com visível microfissuração	57
Figura 4.10 - Alteração ligeira de cor dos provetes prismáticos sem tratamento e após consolidação.....	58
Figura 4.11 - Comparação entre os mesmos provetes 48 horas após terem sido consolidados e 90 dias depois.....	58
Figura 4.12 - Resultados obtidos de massas dos provetes no estado natural (PN) e após consolidação (PC)	59
Figura 4.13 Resultados obtidos de massas dos provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC) através de processos de aplicação diferentes.....	59
Figura 4.14 - Localização em planta das zonas de realização de ensaios in-situ	60
Figura 4.15 - Ensaio de permeabilidade a baixa pressão com tubo de Karsten em diferentes zonas do forte	61
Figura 4.16 - Ensaio para determinação da massa volúmica, porosidade aberta e teor máximo de absorção de água	64
Figura 4.17 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água	65
Figura 4.18 Valores de massas obtidos no ensaio de permeabilidade para os provetes sem tratamento (PN)	67
Figura 4.19 Valores de massas obtidos no ensaio de permeabilidade para os provetes consolidados (PC).....	68
Figura 4.20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	69
Figura 4.21 - Valores médios das curvas de capilaridade.....	70
Figura 4.22 - Ensaio de secagem.....	71
Figura 4.23 - Curvas de secagem dos provetes sem tratamento e consolidados, em função do tempo e da raiz quadrada do tempo.....	72
Figura 4.24 Ensaio de propagação de ultrassons	73
Figura 4.25 - Valores de velocidades obtidos para o ensaio de propagação de sons em provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)	74
Figura 4.26 - Ensaio do modulo de elasticidade dinâmico	75
Figura 4.27 - Resultados obtidos de Ed para os provetes não-tratados (NT) e com tratamento (T)	75
Figura 4.28 Ensaio de resistência à tração por flexão dos provetes.....	76
Figura 4.29 - Resultados obtidos para a resistência à tração por flexão e as respetivas variações	76
Figura 4.30 - Resultados obtidos de Rt para o estado natural e consolidado por capilaridade e por pincelagem.....	77

Figura 4.31 - Ensaio de resistência à compressão	78
Figura 4.32 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão entre os dois tipos de provetes e as respectivas variações de resistências	78
Figura 4.33 - Resultados obtidos de R_c para o estado natural, consolidado por capilaridade e por pincelagem da amostra L	79
Figura 5.1 - Médias dos valores obtidos da massa volúmica aparente, porosidade aberta e teor em água para os provetes sem tratamento e consolidados	81
Figura 5.2 - Evolução média das massas dos provetes não-tratados (PN) e dos provetes com tratamento (PC) em função da raiz do tempo e respetiva variação	83
Figura 5.3 - Curvas de capilaridade, em função da raiz quadrada do tempo.	84
Figura 5.4 - Curvas de capilaridade dos provetes consolidados	85
Figura 5.5 - Valores de coeficientes de capilaridade para os provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC).....	85
Figura 5.6 - Variação das massas no ensaio de secagem dos provetes sem tratamento e respetivas médias em função do tempo e da raiz do tempo	86
Figura 5.7 - Valores obtidos de TS1 e TS2 das curvas de secagem para os provetes no estado natural (PN).....	87
Figura 5.8 - Variação das massas no ensaio de secagem dos provetes consolidados e respetivas médias em função do tempo e da raiz do tempo	87
Figura 5.9 - Valores obtidos de TS1 e TS2 das curvas de secagem para os provetes no estado consolidado	88
Figura 5.10 - Valores do índice de secagem para os provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)	88
Figura 5.11 - Comportamento das curvas de capilaridade e secagem para os provetes no estado natural (PN).....	90
Figura 5.12 - Comportamento das curvas de capilaridade e secagem para os provetes no estado consolidado (PC)	90
Figura 5.13- Valores médios da velocidade de propagação de ultrassons nos provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)	91
Figura 5.14 - Resultados obtidos de E_d para os provetes sem tratamento, e consolidados por capilaridade e por pincelagem.....	92
Figura 5.15 - Variação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c)	93
Figura 5.16 Variação das resistências à tração por flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c) antes e após o processo de consolidação.....	94

Índice de tabelas

Tabela 2.1 – Cronologia da evolução do uso de silicatos de etilo pela comunidade científica	17
Tabela 2.2 Descrição de diferentes provetes em arenito, tipo e aplicação de consolidante e o seu efeito na porosidade e na resistência em compressão uniaxial	23
Tabela 3.1 Posições geomorfológicas do eolianito na região local	25
Tabela 4.1 - Corte das amostras em relação à direção dos estratos e quantidades totais de provetes obtidos	51
Tabela 4.2 - Designação dos provetes obtidos e tipo de processo consolidante aplicado.....	53
Tabela 4.3 - Absorção de água nas zonas consideradas ao fim de 1 hora de ensaio.....	61
Tabela 4.4 - Correlações de vários autores entre o valor de ressaltos (R) e a resistência à rotura em compressão uniaxial (RCU).....	62
Tabela 4.5 - Valores de RCU obtidos a partir das equações utilizando os valores obtidos no presente estudo.....	63
Tabela 4.6 - Valores de massas volúmicas aparentes, porosidade aberta e teor máximo em água absorvida dos provetes não tratados e consolidados	64
Tabela 4.7 - Registo de massas durante o ensaio de permeabilidade ao vapor de água dos conjuntos ‘cápsula húmida+provetes’ dos provetes não tratados, ao longo do tempo de ensaio.....	66
Tabela 4.8 Registo de massas durante o ensaio de permeabilidade ao vapor de água dos conjuntos ‘cápsula húmida+provetes’ dos provetes consolidados, ao longo do tempo de ensaio.	67
Tabela 4.9 - Valores médios do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, π dos provetes naturais e consolidados, ao longo do tempo de ensaio	68
Tabela 4.10 – Valores médios dos coeficientes de capilaridade e valor assintótico no ensaio de capilaridade para os provetes sem tratamento e consolidados	70
Tabela 4.11 - Valores médios das taxas de secagem e valor índice de secagem no ensaio de secagem para os provetes sem tratamento e consolidados	73
Tabela 5.1 - Resultados obtidos de massas volúmicas e porosidade aberta por outros autores e no presente estudo.....	82
Tabela 5.2 - Resultados obtidos do valor de permeabilidade ao vapor de água, π por outros autores e do presente estudo	83
Tabela 5.3 Resultados obtidos de coeficientes de absorção do ensaio de capilaridade encontrados na pesquisa bibliográfica e no presente estudo	86
Tabela 5.4 - Resultados de TS1 e IS provenientes da pesquisa bibliográfica e do presente estudo	89
Tabela 5.5 - Resultados de velocidade de ultrassons provenientes de outros autores e do presente estudo.....	91
Tabela 5.6 - Resultados do módulo de elasticidade provenientes da bibliografia e do presente estudo	93
Tabela 5.7 - Resultados obtidos de resistências mecânicas (compressão e tração por flexão) por outros autores através do método de aplicação por capilaridade, imersão total ou parcial e pelo presente estudo.....	95

Tabela 5.8 - Resultados obtidos de resistências mecânicas (compressão e tração por flexão) por outros autores através do método de aplicação por pincelagem e pelo presente estudo.	95
--	----

Lista de abreviaturas e símbolos

Símbolos

E_d – Módulo de elasticidade dinâmico

F – Força

k – Coeficiente de absorção de água a baixa pressão

L_0 – Comprimento longitudinal inicial

M – Massa

M_i – Acréscimo de massa de água que ascende por capilaridade na secção de um provete

n – Porosidade aberta

ρ – Massa volúmica aparente

π – Permeabilidade ao vapor de água

Q_f – Água absorvida

R – Valor do ressalto no ensaio com esclerómetro

W_f – Volume de água absorvida por unidade de área

Abreviaturas e Siglas

CC – Coeficiente de capilaridade

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DCT – Departamento de Ciências da Terra

DGEMN – Direção-Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais

DP – Desvio-padrão

EN – Norma Europeia

FCT – Faculdade de Ciências e Tecnologias

HR – Humidade relativa

IHRU – Instituto da Habitação e da Reabilitação Urbana

INETI – Instituto Nacional de Engenharia, Tecnologia e Inovação

IS – Índice de secagem

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

MTEOS – Metiltrimetoxisilano

Op. cit. – *Opus citatum*

PN – Provete natural, sem consolidação

PC – Provete consolidado

PCB – Provete consolidado por pincelagem (brushing)

PDMS - polidimetilsiloxano

RCU – Resistência à compressão uniaxial

SEM – *Scanning electron microscope*

SNPRCN – Serviço Nacional de Parques, Reservas e Conservação da Natureza

TG – Tegovakon – produto consolidante à base de silicatos de etilo

TEOS – Tetraetoxisilano/ortosilicato de tetraetilo/silicato de etilo/éster de silício

TS1 – Taxa de secagem correspondente ao declive do troço inicial da curva, em função do tempo

TS2 – Taxa de secagem correspondente ao declive da secção linear da curva, em função da raiz do tempo

UNL – Universidade Nova de Lisboa

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

VA – Valor assintótico

ZERO – Associação Sistema Terrestre Sustentável

Capítulo 1 - Introdução

1.1 Considerações iniciais

O estudo do comportamento físico-mecânico e químico e os principais mecanismos de degradação dos arenitos tanto em maciços rochosos como em pedra utilizada como material de construção de edificações tem tido bastante desenvolvimento a nível internacional.

Tendo em conta que no património edificado português as rochas mais representadas são as calcárias e as graníticas, o estudo dos arenitos acaba por ter menor relevância a nível nacional por serem escassos os monumentos construídos com esse material lítico.

Este tipo de rocha quando aplicado no edificado, seja em blocos de alvenaria de pedra, cantarias ou outro tipo de elemento construtivo, acaba por sofrer uma degradação ao longo do tempo através de diferentes mecanismos cuja intensidade varia com diversos fatores como a localização geográfica, o clima, a proximidade ao mar, entre outros.

Subjacente à degradação que se verifica na pedra, surge a necessidade de implementar processos que mitiguem o acelerar destes fenómenos. Os tratamentos de conservação em elementos pétreos têm vindo a ser realizados desde sempre, acompanhados de alterações devidas ao avanço tecnológico e ao aparecimento constante de novas técnicas e produtos.

A conservação através de processos de consolidação traduz-se numa ação que pretende aumentar a coesão dos elementos pétreos, dotando-os de uma maior capacidade resistente à meteorização causada por agentes da Geodinâmica Externa. Esta ação de impregnação no meio poroso induz uma redução da porosidade e o seu efeito deve constituir uma melhoria em relação ao estado anterior, sem que ocorram efeitos secundários indesejados.

Neste sentido, pretende-se com esta dissertação contribuir para o estudo dos arenitos como material de construção no edificado patrimonial do Forte da Praia do Pessegueiro e o efeito do uso de produtos consolidantes na sua alterabilidade. Como tal, caracterizou-se o seu comportamento físico-mecânico em laboratório em provetes não tratados e tratados por consolidação, tendo-se analisado os seus resultados.

1.2 Objetivos e metodologia

A presente dissertação tem como objetivo alargar o conhecimento das características de arenitos utilizados como material de construção e a influência de um tratamento consolidante para avaliação da eficácia deste. O estudo em causa baseou-se num antigo forte militar, localizado na praia do Pessegueiro, construído com aquele material.

Para tal, foram recolhidas amostras provenientes da zona envolvente às muralhas do forte, sem comprometer o seu estado de conservação, estando desagregadas deste. Estas foram posteriormente submetidas a avaliação das suas características no âmbito de uma campanha experimental, através de provetes prismáticos e cilíndricos, obtidas através das amostras originais.

Procedeu-se à aplicação de um tratamento de conservação do tipo consolidante através de dois métodos de aplicação: por capilaridade e por pincelagem e estudou-se a influência destes tratamentos sobre a pedra tratada, em termos de resistências mecânicas e parâmetros físicos.

Os resultados obtidos nos provetes tratados e não tratados foram analisados e comparados, tendo sido interpretados através de gráficos.

1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação é constituída por seis capítulos, enunciados no seguimento do texto de forma sintética e organizados da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução apresenta o enquadramento do tema, onde são enunciadas as principais motivações que levaram à seleção deste tema, os objetivos e as metodologias adotadas para a realização do trabalho proposto.

Capítulo 2 – Estudos sobre arenitos apresentam-se os resultados da pesquisa bibliográfica realizada sobre o conhecimento científico e académico referente à utilização de arenitos como material de construção a nível nacional, europeu e mundial, as principais características físicas e mecânicas e os mecanismos de degradação. Para além disto é abordado o panorama científico sobre o uso de produtos consolidantes, especificamente o uso de alcoxisilanos, as suas condições e métodos de aplicação. É realizada uma introdução ao produto consolidante utilizado nesta dissertação, um silicato de etilo (TEOS) da marca comercial Tegovakon e apresentada a sua formulação química.

Capítulo 3 – Caso de estudo: O forte da Praia do Pessegueiro apresenta o caso de estudo no seu contexto geológico e climático, caracterizando-o através da identificação dos seus processos construtivos, dos mecanismos de degradação observados e do tipo de intervenções realizadas ao longo dos últimos anos.

Capítulo 4 – Procedimentos experimentais são apresentados os procedimentos da campanha experimental realizada através de ensaios de caracterização física e mecânica dos provetes não tratados e dos provetes submetidos a dois processos de consolidação (capilaridade e pincelagem). Refere-se também a forma como se procedeu à obtenção das amostras prismáticas e cilíndricas a partir de amostras de pedra natural daquele material arenítico. São enunciados os resultados gerais através de gráfico e/ou quadros.

Capítulo 5 – Análise e discussão dos resultados são discutidos os resultados obtidos a partir dos ensaios enunciados no capítulo anterior, analisados de forma mais particular e comparados com os resultados encontrados na pesquisa bibliográfica de outros autores.

Capítulo 6 - Conclusões apresenta as conclusões obtidas da presente dissertação e apresentam-se algumas propostas de desenvolvimento futuro que não foram tidas em conta e que são relevantes para o aprofundamento do estado do conhecimento dos arenitos e da contribuição dos processos de consolidação.

Por último, são apresentadas todas as **referências bibliográficas** enunciadas durante a presente dissertação e no seguimento são apresentados os seguintes anexos:

Anexo I apresenta os resultados individuais dos ensaios realizados durante a campanha experimental.

Anexo II que apresenta o resumo aceite pela Comissão Organizadora do Congresso ‘Construção 2018’ a decorrer nos dias 21 a 23 de novembro.

A presente dissertação foi escrita segundo a metrologia legal que se encontra normalizada para todas as grandezas e respetivas unidades.

Todas as figuras da presente dissertação que não estejam associadas a referências com bibliografia foram obtidas pelo autor desta dissertação.

Capítulo 2 - Estudos sobre arenitos

2.1 Considerações iniciais

Enuncia-se no presente capítulo a utilização dos arenitos como material de construção presente no património construído em Portugal bem como a nível europeu e mundial e os principais mecanismo de degradação que afetam o comportamento deste material pétreo como a ação dos sais, os ciclos de gelo-degelo e a ação dos seres vivos. De seguida introduz-se uma revisão histórica do uso de consolidantes como processo de conservação, com particular incidência sobre o uso de silicatos de etilo, a sua constituição química, os principais métodos de aplicação e as condições de atuação. São enunciadas algumas variantes a este tipo de composto orgânico, como as formulações inorgânicas e o recurso às resinas sintéticas.

2.2 Os arenitos como material de construção no património edificado

2.2.1 Património nacional e mundial edificado em arenito

As rochas areníticas representam no edificado nacional uma pequena percentagem em relação a outros tipos líticos. As formações geológicas de Portugal onde se verifica a presença de arenitos concentram-se nas Orlas Ocidental ou Lusitaniana e Algarvia, o que justifica a presença de alguns edificados construídos em arenitos nestas zonas, como são os casos da Igreja de S. Leonardo na Atouguia da Baleia, conselho de Peniche, o Forte da Ilha de Dentro, ou da Praia do Pessegueiro, próximo de Porto Covo, Sines e o Castelo de Silves, no Algarve.

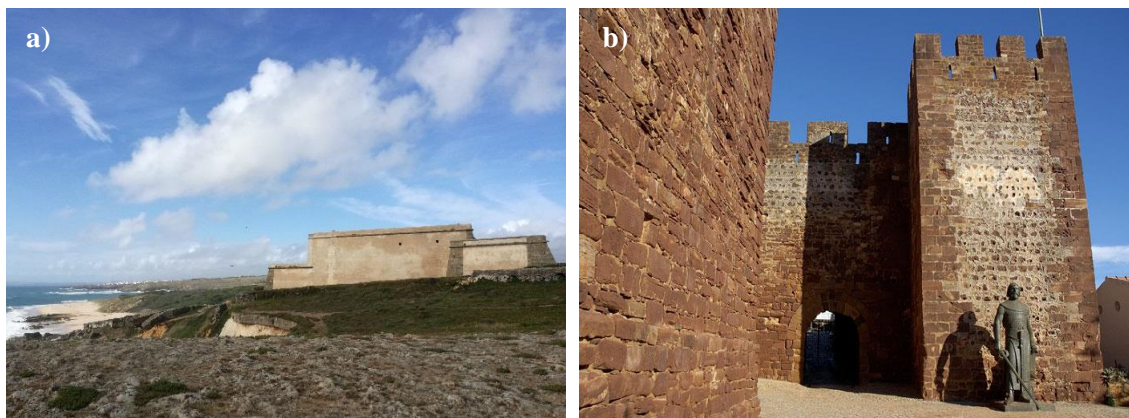
Marques (2008) contribuiu para o estudo deste material através do trabalho sobre o edificado monumental em arenito de Atouguia da Baleia, concelho de Peniche (Figura 2.1).



(Fonte: Marques, 2008)

Figura 2.1 - Igreja de S. Leonardo na Atouguia da Baleia, Peniche

A Figura 2.2 ilustra o edificado monumental do caso em estudo e o designado Grés de Silves, localizado no sul do território português.

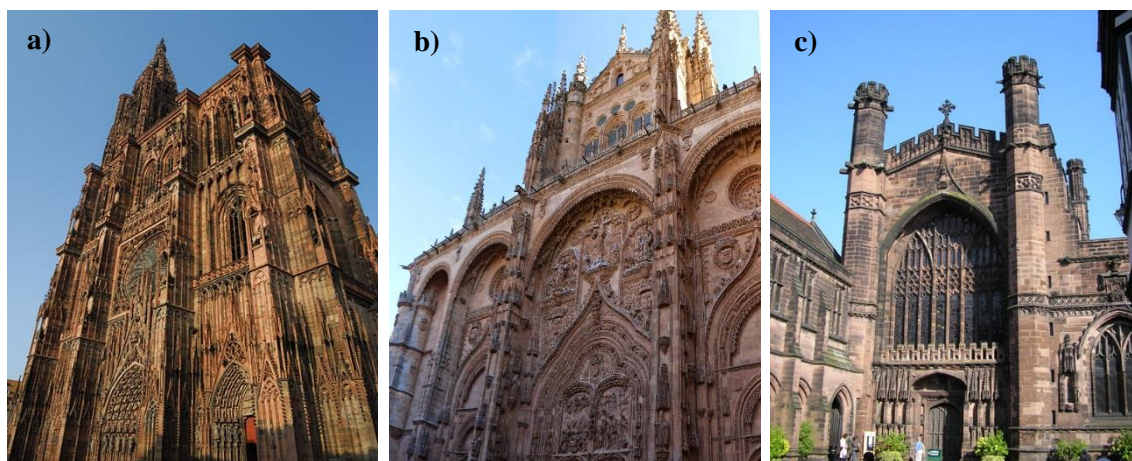


a) Forte da Praia do Pessegueiro; b) Castelo de Silves, no Algarve (fonte: jornaldemonchique.pt)

Figura 2.2 – Exemplos de estruturas em Portugal construídas em arenito

Segundo Marques (2008), a pedra arenítica é vastamente representada em monumentos europeus considerados património cultural, desde a época medieval (séculos V a XV) até aos tempos modernos e, como tal, o recurso a este tipo litológico foi amplamente utilizado em castelos, catedrais e outros monumentos de grande importância cultural como Espanha, França, Alemanha, Itália, Áustria, Suíça, Bélgica, Hungria, República Checa ou Grã-Bretanha. A sua presença é mais marcante no centro e norte da Europa, sendo no Sul mais frequente a presença de rochas carbonatadas.

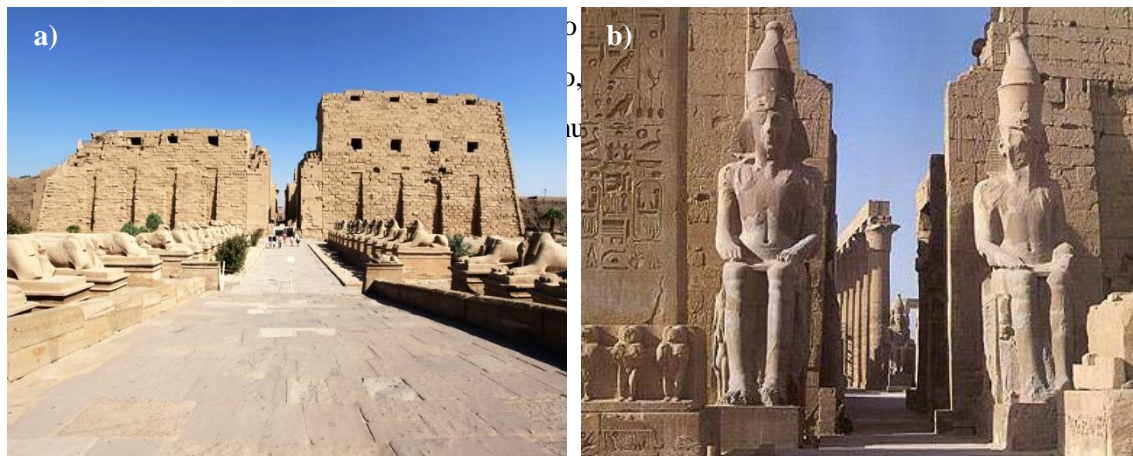
A construção com arenitos está bastante presente na grande maioria das catedrais e castelos do estilo arquitetónico românico e gótico da Europa Central. A Figura 2.3 apresentam alguns monumentos construídos com este material.



a) Catedral de Estrasburgo, França; b) Catedral de Salamanca, Espanha; c) Catedral de Chester, Inglaterra (deposi-tpotos.com)

Figura 2.3 - Exemplos de monumentos construídos em arenito.

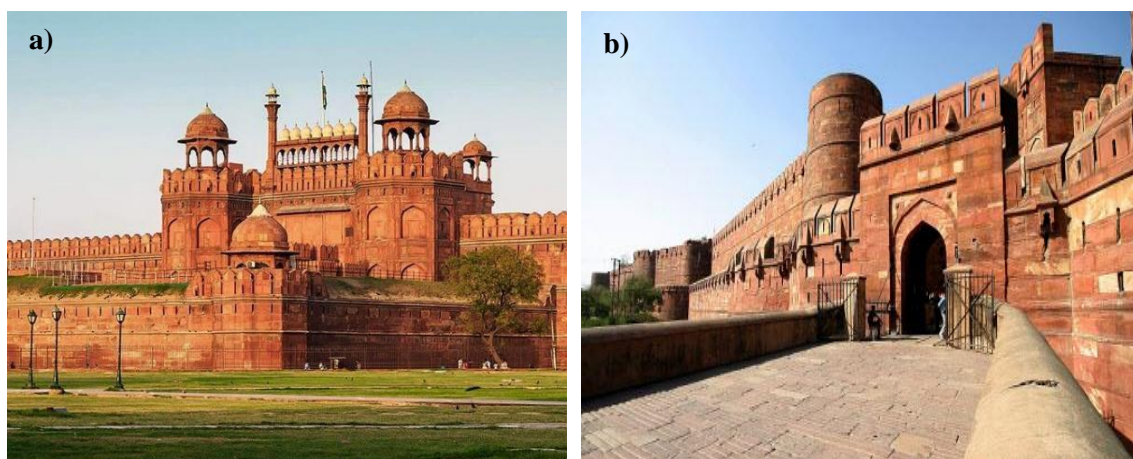
A nível mundial, os arenitos vincaram a sua presença principalmente no Norte de Africa e Médio Oriente. A norte do continente africano, em países como a Tunísia ou Egito, assumindo este último uma importância ímpar em termos de testemunhos edificadas em arenito, presentes no seio da civilização egípcia. Tebas, que chegou a ser a capital do Egito, contribui com os templos de



a) Templo de Karnak; b) Templo de Luxor (fonte: depositphotos.com)

Figura 2.4 - Exemplos de monumentos em arenito no continente africano

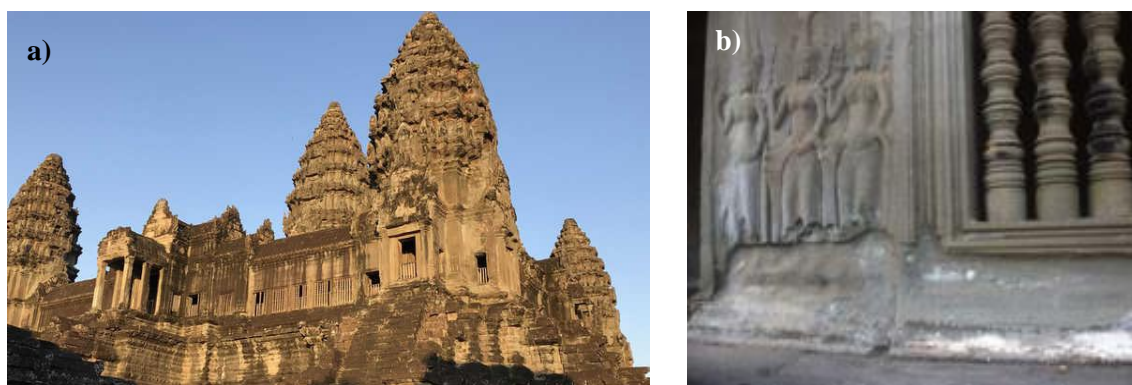
No continente asiático destacam-se os arenitos de cor avermelhada, principalmente na Índia, como o Forte Vermelho (Figura 2.5a), localizado em Delhi e que influenciou futuras edificações na região como a que se encontra nas imediações dos jardins do Taj Mahal: o Forte de Agra (Figura 2.5b), um monumento do período Mogul do século XVI.



a) Forte Vermelho, em Dehli; b) Forte de Agra, perto do Taj Mahal (fonte: depositphotos.com)

Figura 2.5 - Exemplos de monumentos em arenito no continente asiático (Índia)

No sudeste asiático encontra-se um dos mais importantes centros arqueológicos, igualmente classificado como património mundial pela UNESCO. Construído no séc. XII, o templo de Angkor Wat (Figura 2.6a) pertence a um complexo com uma extensa área e onde se observam cravados nos paramentos de arenitos e laterites, figuras mitológicas, divinas e diversos ornamentos. Segundo o trabalho de Siedel et al. (2008) é possível observar vários tipos de degradação destes arenitos como destacamentos, erosão ou eflorescências de sais (Figura 2.6b).

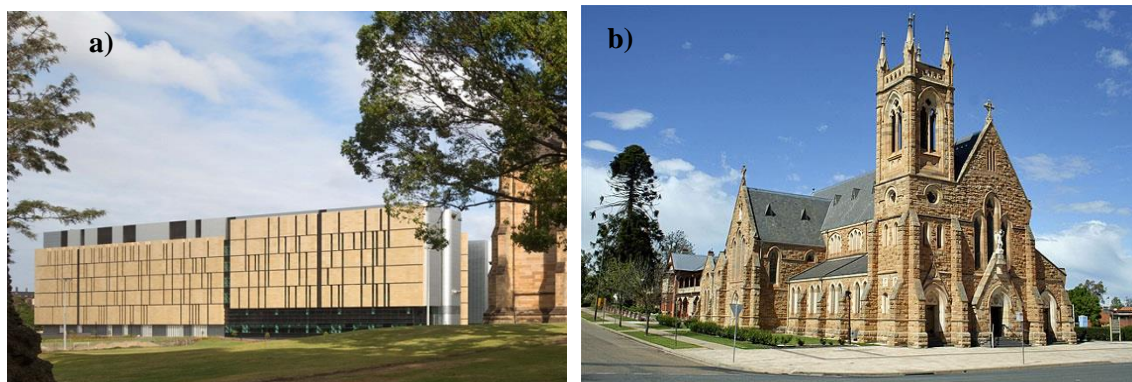


a) Angkor Wat, Camboja; b) detalhe dos destacamentos e das eflorescências de sais in Siedel, 2008

Figura 2.6 - Exemplos de monumentos em arenito no continente asiático (Camboja)

Na Oceânia surge um caso de utilização de arenitos num edifício moderno, construído em 2012, o Centro Charles Perkins, um instituto de investigação médico, em cuja fachada norte foram utilizados arenitos, tendo o restante sido construído em vidro e alumínio (Figura 2.7a).

Na América existem vários casos de implementação desta pedra; por exemplo, foi utilizada na construção de Washington e Nova Iorque, nos séculos XVIII e XIX e não é exceção na América do Norte, onde existem várias catedrais construídas com material arenítico, como é o caso da Catedral de St. Michael, no Canadá (Figura 2.7b).



a) Fachada Norte do Centro Charles Perkins (Sidney, Austrália) (fonte: architectureanddesign.com); b) Catedral de St Michael (Toronto, Canadá)(depositphotos.com)

Figura 2.7 - Exemplos de monumentos em arenito no continente americano

É perceptível a vasta presença de arenitos em construções por todo o mundo, transversal aos diferentes tempos e estilos arquitetónicos que marcaram a cultura das civilizações e que são um marco histórico que está enraizado devido ao seu património edificado. Uma das razões desta elevada frequência é o facto de os arenitos serem um material abundante, constituído principalmente por quartzo e feldspato, que são os minerais mais comuns que podem ser encontrados na crosta terrestre, para além de ser um material fácil de trabalhar.

2.2.2 Características mecânicas e físicas associadas aos arenitos

A proteção e conservação de monumentos com valor histórico ganhou um importante papel em todas as sociedades modernas. Desde os tempos pré-históricos, são inúmeras as estruturas e monumentos em arenito que foram construídos por todo o mundo, o que se justifica com a quantidade existente deste material na superfície terrestre e pelo facto de ser fácil de extrair e de trabalhar.

As construções areníticas, devido à forte vulnerabilidade aos agentes de meteorização, ganham particular atenção no que diz respeito à sua conservação. As rochas areníticas são rochas clásticas, com textura granular, compostas por fragmentos arredondados de rocha e grãos de minerais, unidos entre si através de um ligante mineral ou outro material geológico. A caracterização de uma rocha arenítica pode ser dividida nos seguintes componentes: o tamanho dos grãos, a matriz ou ligação cimentícia e o espaço poroso (Siegesmund & Dürrast, 2011).

A estrutura interna da rocha é definida pela dimensão dos seus grãos, originalmente separados da rocha-mãe; este material depende da litologia do território de onde proveio. Os minerais mais comuns são o quartzo, o feldspato e a mica; no entanto também é possível encontrar vestígios de anfíbola, piroxena ou olivina. Em zonas marítimas ou perto destas, é frequente haver vestígios de grãos carbonatados de origem biogénica, provenientes da desagregação e dissolução de conchas ou algas (Bell, 1978).

O comportamento mecânico dos arenitos depende das suas propriedades mineralógicas, da porosidade e das forças de ligação entre as partículas constituintes. A composição mineralógica representa um dos parâmetros que contribuem para a resistência da rocha. Os minerais de quartzo podem contribuir positivamente para o aumento de resistência (Smart et al., 1982; Gunsallus & Kulhawy, 1984) ou, pelo contrário, em algumas situações não ter qualquer influência (Bell, 1978; Dobereiner & Freitas, 1986). Esta resistência está também fortemente relacionada com a sua cimentação: quanto maior for a força das ligações entre as partículas, maior será a resistência (David et al., 1998). Em particular as ligações ricas em sílica ou calcárias são mais fortes do que ligações argilosas (Lama & Vutukuri, 1978). Muitos estudos relacionam as características mecânicas e as propriedades petrofísicas (Bell, 1978; Jeng et al., 2004) ou texturais (Hugman, 1978). As propriedades petrofísicas, que incluem a massa volúmica, porosidade, permeabilidade, teor em água, etc., determinam o comportamento das rochas, enquanto as características texturais caracterizam aspetos geométricos como a dimensão das partículas, a sua forma, orientação, grau de ligação entre elas e a caracterização da rede granular (Williams et al., 1982).

Como foi mencionado, a vantagem da trabalhabilidade destes arenitos implica igualmente uma desvantagem, devido ao facto de ser um material relativamente poroso, a tendência a deteriorar é maior. Este tipo de construções apresenta frequentemente estados de deterioração avançados, em particular exfoliações, fissuras, descolamentos, erosão alveolar, etc (Figura 2.8).



Figura 2.8 – Evidências de desgaste de material arenítico

A tendência ao desgaste do material aumenta consoante as condições a que estiver exposto, estando uma estrutura situada no exterior mais propensa a deteriorar do que uma estrutura situada no interior, protegida de agentes externos. Quando se refere a estado de deterioração, um dos parâmetros mais importantes a ter em conta é a porosidade, representando a interface de ligação e passagem entre o objeto e a envolvente exterior estando estas muito vulneráveis a processos destrutivos como a cristalização de sais, a ação do gelo-degelo e a biodeterioração. No entanto, é importante referir que a porometria, ou seja, a dimensão dos poros, tem uma influência igualmente importante no controlo das ações capilares da água por induzir a ascensão capilar e o transporte de sais para o interior das rochas (Steiger et al., 2011). Para além deste, Colas & Mertz (2012) provaram que a influência do vento pode acelerar esta ascensão capilar e a mesma depende da quantidade de macroporos em rochas areníticas. A ação do vento é fortemente sentida em ambientes costeiros, onde a proximidade ao mar a aumenta consideravelmente, contribuindo ativamente para a percolação da água no interior das rochas, tal como acelera a sua evaporação. Após a evaporação da água capilar, inicia-se o processo de cristalização de sais no interior dos poros que, por expansão de encontro às suas paredes, contribui para dissociar os grãos envolventes (Simão et al., 2013).

2.2.3 Mecanismos de degradação dos arenitos

2.2.3.1 A ação dos sais

A cristalização de sais é um dos processos mais comuns de meteorização do material rochoso. Aqueles ocorrem após a entrada da água através de fissuras ou dos poros para o interior da rocha. Esta degradação é normalmente atribuída à “presença de sais” ou à variação de pressão imposta

pela cristalização de um determinado sal sobre as paredes dos poros e fissuras. No entanto este processo é condicionado por vários mecanismos. Para existir algum tipo de dano, os sais necessitam de circular por entre o corpo poroso, um processo que requer a ação de água, que nele se introduz no estado líquido e/ou na forma de vapor de água. No estado líquido o processo ocorre através de capilaridade e/ou infiltração, sendo a primeira o resultado da sucção da água pelos poros, enquanto que a infiltração envolve pressões hidrostáticas e depende da permeabilidade do material. No caso do vapor, a entrada pode ser feita através de condensação ou higroscopicidade. A condensação pode ser superficial ou ocorrer no interior dos poros. (Charola, 2000).

A introdução de sais no interior dos poros pode ser realizada através de dois mecanismos: ascensão capilar a partir do terreno, principalmente em locais ricos em matéria orgânica, e infiltração de nitratos, nitritos, sulfatos, etc., provenientes da poluição atmosférica. Uma vez os sais no interior dos poros, aqueles vão ser fortemente afetados pelas condições ambientais, como a temperatura e a humidade relativa (Charola, *op.cit.*).

Como foi referido, a existência de sais no interior das rochas não representa, só por si, o maior problema, no entanto, na presença de água, os sais dissolvidos migram através da sua percolação até às cavidades porosas onde precipitam sob a forma de eflorescências. A higroscopicidade dos sais, ou seja, a capacidade de absorção de humidade do ar, faz com que se dissolvam quando estão na presença de humidade relativa (HR) entre 65 % e 75 %, ocorrendo a cristalização quando os valores de HR baixam. Este processo de formação de cristais é acompanhado de um considerável aumento de volume, resultante dos vários ciclos de dissolução-cristalização (Henriques, 1994).

Segundo Henriques (*op. cit.*) os sais solúveis que mais frequentemente se encontram associados a manifestações patológicas são os sulfatos, os carbonatos, os cloretos, os nitritos e os nitratos, correspondendo cada um a diferentes pressões de cristalização (Steiger et al., 2011). A sua origem está associada a diferentes fontes como o nevoeiro salino, no caso de ambientes costeiros, contaminação atmosférica, provocada pelo tráfego automóvel ou por complexos industriais com libertação de gases no seu processo, produtos químicos de limpeza, sais usados na agricultura, químicos utilizados em ações de conservação ou reabilitação, ou provenientes da dissolução de excrementos de animais (Siedel et al., 2008).

Conclui-se que os sais no interior das rochas nem sempre correspondem à causa que origina a patologia, mas a sua presença afeta ou pode aumentar a degradação significativamente, tendo a água e/ou humidade o papel catalisador no processo de aceleração. Este processo ganha um relevo superior à medida que a proximidade ao mar é maior, condição presente no edificado em estudo.

2.2.3.2 Ação do gelo-degelo

A deterioração causada pela ação do gelo-degelo é um mecanismo que está relacionado com o processo anterior e que resulta quando ocorre uma mudança de estado da água no vazio dos poros. Uma das consequências associadas também diz respeito à variação ou expansão volumétrica, que induz igualmente uma pressão interna sobre as paredes dos poros. (Steiger et al. 2014)

A taxa de degradação provocada por este mecanismo depende da resistência da rocha aos ciclos de gelo-degelo a que esta está sujeita, influenciada pelas condições atmosféricas do meio onde se insere. A degradação provocada por este tipo de ação pode exponencializar-se através da combinação com alguns sais, como o sulfato de sódio ou cloreto de sódio e a sua eficácia depende não só da concentração e do tipo de sal solúvel, como da intensidade dos ciclos de gelo-degelo (Williams & Robinson, 2001).

2.2.3.3 Ação de seres vivos

A ação dos seres vivos como mecanismo de degradação de pedras naturais pode ser manifestada através da ação de fungos (Dragovich, 1993), cianobactérias (Danin, 1983), líquenes (Ascaso et al., 1998), algas, musgos (Aires-Barros, 2001; Dionisio, 2002) e animais (Siedel et al., 2008).

A ação dos líquenes é o tipo de alteração biológica que tem sido mais investigada. Os primeiros estudos realizados recorrendo a observação com microscópios óticos mostrou que a sua ação provoca alterações significantes nos substratos rochosos (Ascaso et al. 1998). Alguns estudos são no entanto contraditórios e autores como Ariño et al., (1995) sugeriram mesmo que a sua ação poderia ter um papel protetor da rocha, o que até poderia levar à aceleração da degradação em caso de remoção.

Edwards et al. (2002) num estudo realizado em arenitos de Marrocos, mostraram que a fonte de alimentação destes seres vivos era o substrato onde os mesmos estavam alojados. A sua influência em relação ao tipo de clima foi estudada por alguns autores, como Viles (1987), o qual concluiu que a atividade dos seres vivos seria menos prejudicial em climas mais húmidos como o da Inglaterra. Por seu lado, Edwards et al., (2002) estudaram a sua ação em arenitos no clima árido de Marrocos. Em ambos os casos verificaram-se incrustações devido a biodeterioração por líquenes. Pode-se concluir que a sua atividade varia com as diferentes litologias e com os climas das latitudes onde se inserem.

A Figura 2.9 conjuga vários fatores de degradação que resulta na presença de líquenes num paramento arenítico influenciada pela subida da água, através da ação do vento e das características intrínsecas do material, acumulando-se na fronteira até ao ponto de subida da água.



Figura 2.9 – Evidências da presença de líquenes num paramento arenítico

2.3 Conservação e consolidação de arenitos

A pedra é um dos materiais de construção mais antigos e a sua conservação representa um dos maiores desafios. A caracterização da pedra de construção é fundamental para determinar a forma como se deve abordar a sua degradação com o objetivo de manter, ou melhorar, as suas propriedades. Um dos fatores mais importantes para a conservação da pedra é o aspeto visual, e uma das maiores dificuldades prende-se com a inalterabilidade do aspeto original, visto que os grandes casos de estudo são monumentos com grande importância cultural, histórica ou social, onde a prioridade passa por manter o aspeto inalterado, apesar da conservação através de consolidantes se tratar de um processo irreversível.

Estas rochas naturais, utilizadas em monumentos, são desde muito cedo sujeitas a diferentes formas de meteorização, sejam elas de natureza física, química ou biológica. A degradação que sofrem devido a estes fatores é um processo complexo de alterações constantes devido à ação do vento, chuva, radiação solar e ciclos de gelo-degelo. A exposição aos agentes exteriores, como chuvas ácidas, também contribui para o incremento da meteorização. Esta tendência das rochas naturais em ambientes exteriores face a todos estes fatores de deterioração, faz com que sejam objeto de estudo para a aplicação de tratamentos através de processos de consolidação.

A ação de consolidação de uma rocha consiste na recuperação da sua coesão interna. Na verdade, este processo já revelou que é possível não só restituir as condições que outrora o material já

tivera, como aumentar significativamente as suas características mecânicas originais (Pinto & Rodrigues, 2008; Sassoni et al., 2013; Marques & Chastre, 2014).

O facto deste processo de consolidação ser irreversível justifica a quantidade de estudos que têm sido realizados em consolidantes de rochas. Em geral, têm sido utilizados produtos orgânicos e inorgânicos, embora com muito mais relevância dos primeiros em relação aos segundos. Os produtos inorgânicos, como o hidróxido de cálcio, o hidróxido de bário ou o oxalato de amónio são utilizados com o objetivo de atuar em camadas muito superficiais, tendo em conta que a sua capacidade de penetração é baixa. No entanto, este tipo de produtos tem sido usados em tratamentos muito específicos devido à sua compatibilidade no caso de rochas afetadas pela ação de cristalização de sais (Matteini, 2008).

Os produtos orgânicos têm sido mais estudados, nomeadamente os alcoxisilanos, resinas acrílicas ou epoxídicas e, em consequência, muitos autores têm convergido quanto à aplicação deste tipo de produtos. As formulações baseadas em alcoxisilanos são as que mais abundam nas referências encontradas sobre tratamentos de rochas naturais com consolidantes, revelando-se soluções que promovem o aumento da durabilidade de edifícios com este tipo de material. Dois compostos têm sido dominantes: ortosilicato de trimetil (MTMOS) e ortosilicato de tetraetilo (TEOS). Estes consolidantes são absorvidos pela rocha, sofrem hidrólise na presença de água formando ligações Si-O (sílica-oxigénio) que depois polimerizam numa reação de condensação formando um polímero que faculto o aumento de resistência (Pinto & Rodrigues, 2008).

As resinas acrílicas também têm sido utilizadas frequentemente na conservação. Normalmente dissolvidas em solventes orgânicos como a Paraloid B72, aquelas podem promover um aumento de resistência; no entanto a sua fraca penetrabilidade no interior da rocha limita a sua utilização (Laurenzi Tabasso & Santamaria, 1985). As resinas epoxídicas também são capazes de promover grandes aumentos de resistência mecânica, em alguns casos até superiores a produtos baseados em silicatos de etilo (TEOS ou MTMOS); no entanto estão associadas a fortes variações de cor, para além do facto de ainda não estarem definidos métodos de aplicação adequados (Pinto & Rodrigues, 2008).

2.3.1 A evolução do uso dos consolidantes

O estudo sobre o melhor consolidante a aplicar em pedras utilizadas em construção já é um assunto antigo e muitos são os produtos que foram sendo desenvolvidos e testados em vários tipos de rochas. Os consolidantes têm sido usados como forma de tratamento em várias situações como em manifestações de deterioração através de lascas, escamações ou desintegração granular e na generalidade de degradações mecânicas. Todas elas resultam da perda de ligações intergranulares e o principal objetivo de um tratamento com consolidantes é reparar estas fragilidades. O sucesso

deste processo depende do conhecimento das condições existentes e na avaliação adequada do consolidante usado para o tratamento em causa (Pinto & Rodrigues, 2008).

Os produtos utilizados em processos de consolidação de elementos pétreos podem ser diversos, de natureza orgânica ou inorgânica; no entanto evidenciou-se um componente de entre uma gama extensa, cujo principal elemento constituinte é o silício (Wheeler, 2005).

A primeira referência a um produto composto por silicatos data de 1824, embora com pouco impacto ou divulgação. Seguiu-se um período de gestação onde surgiu a formulação de vários compostos à base de silicatos, que inclui dois alcoxisilanos que mais tarde viriam a ganhar importância no campo da conservação: ortosilicato de tetraetilo ou tetraetoxisilano (TEOS), ortosilicato de trimetilo ou metiltrimetoxilano (MTMOS).

Na primeira metade do séc. XX começaram a surgir os primeiros trabalhos na área da conservação realizados com recurso a silicatos de etilo sem, contudo grandes certezas sobre qual o melhor material a utilizar, sendo mesmo aqueles compostos utilizados como suporte para pintura. No início da segunda metade do século (1956) é publicado o primeiro texto onde é dito que “para arenitos e calcarenitos de considerável dimensão, não-expostos ao ambiente exterior, o silicato de etilo é considerado o agente endurecedor com maior sucesso”. Sucedem-se, ainda nas décadas de 50 e 60, trabalhos envolvendo este composto com maior variedade de amostras. São referidos resultados positivos e com sucesso em tratamentos sobre arenitos e argamassas (Shore, 1957).

O final da década de 60 foi um ponto de viragem no que diz respeito ao estudo e uso de alcoxisilanos em rochas, com o trabalho de Lewin (1966) que apresentou uma nova formulação baseada num silicato de etilo, referindo porém, que seria difícil, se não impossível, encontrar um único tratamento para todos os tipos de rochas. Na mesma altura, Plenderleith & Werner (1971) obtinham bons resultados para arenitos e calcarenitos, ao invés de calcários de boa qualidade, onde os resultados ficaram aquém do esperado. Começava-se a perceber que os silicatos de etilo não tinham um bom desempenho em determinados tipos de rochas calcárias.

Na década de 70, Aguzzi et al. (1973) salientaram fraca penetrabilidade com a formulação baseado em silicatos de etilo que Lewin elaborou, formando uma superfície endurecida mas frágil ao toque, enquanto Weber (1976) salientou o poder penetrante e a alta absorvência em rochas porosas de um consolidante baseado em TEOs que viria a ser designado de Wacker H e patenteado por Bosch (1973). A penetração do consolidante continuava a ser uma questão importante no desempenho do produto.

Seguiram-se períodos de aumento exponencial de tratamentos com alcoxisilanos e as rochas que predominavam como objeto de estudo eram arenitos, rochas calcárias e mármore. Os tratamentos envolviam maioritariamente TEOs com as marcas comerciais Wacker H e OH e Tegovakon V e

T a serem predominantes nos estudos de consolidantes. Em meados dos anos 80, os produtos baseados em silicatos de etilo começaram a ser utilizados com bastante frequência em rochas calcárias e mármore.

A influência do consolidante sobre a diferente mineralogia de cada rocha e a forma como atuava no interior dos poros sempre foi uma questão pouco desenvolvida até esta altura, no entanto é possível encontrar um comentário sobre o gel que se formava após a consolidação através do trabalho de Laurie (1926), onde se relata ter-se formado um gel macio, fraco e incoerente em rochas calcárias e algo mais homogêneo, rijo e com aspeto vitrificado em arenitos. Snetlage & Klemm D. (1978), Domaslawski & Lukaszewicz (1988) e Goins (1995) verificaram através de análise com recursos a SEM que existia a presença de ligações entre os grãos de quartzo em rochas areníticas e o gel de sílica que se formava. Relativamente às rochas calcárias, as ligações entre a calcite e o consolidante não se verificava, observando-se depósitos isolados de gel. Charola et al. (1984) observaram ligações de gel de sílica derivados de um MTMOS em rocha calcária, enquanto Kumar & Ginell (1995) examinou as reações de MTMOS em contacto com silicatos e rochas carbonatadas através de espectrometria infravermelha, para concluir que a ligação no caso das rochas calcárias era nula. Esta diferença era traduzida em termos de resistência, quando Goins (1995) ensaiou arenitos e rochas calcárias exclusivamente formada por calcite, e constatou que a diferença em termos de resistência à flexão era oito vezes superior no caso dos arenitos consolidados com o mesmo produto (Wacker OH). Esta diferença não é explicada se é devida à ligação ou à falta dela. O mesmo incremento da resistência mecânica em arenitos ricos em quartzo e calcários ricos em calcite, provocado por MTMOS, foi verificado por De Witte et al. (1985) onde, novamente, o aumento em arenitos era superior ao aumento em calcário, explicado pela forte adesão entre o consolidante e os minerais que constituem aquela rocha.

Apesar dos tipos de rocha que foram sujeitos a tratamento com consolidantes até esta altura ser muito limitado às litologias mencionadas, deve ser realçado que a frequência de tratamentos de consolidação está diretamente relacionada com a frequência do seu uso e a tendência para as mesmas se deteriorarem, daí a quantidade de trabalhos em rochas areníticas ou calcárias. Segundo Wheeler et al. (1992) os estudos efetuados sobre a utilização de produtos consolidantes à base de tetraetoxisilanos ou metiltrimetoxisilanos, ou na generalidade dos alcoxisilanos, revelaram melhores resultados das aplicações em materiais areníticos do que nos calcários.

O tipo de rocha influencia ativamente a forma como o processo de consolidação decorre, em que profundidade e sobre que condições, de forma a entender a influência que os minerais que a constituem têm em todo o processo. Cada tipo de rocha carrega consigo informação acerca da sua composição e estrutura e será possível concluir mais tarde que a composição mineral e porosidade

(entenda-se total acesso ao interior dos poros) são os principais fatores que contribuem para uma consolidação eficaz.

O universo das rochas, se se tiver em conta apenas a fator mineral, pode ser dividido em rochas carbonatadas, como são os calcários e os mármore, constituídos principalmente por calcite; e as rochas silicatadas como os arenitos e os granitos, formados essencialmente por minerais de quartzo e feldspato (Charola et al., 1984). Concluiu-se que as reações na presença de calcite são muito mais lentas do que na presença de quartzo, o que faz com que a consolidação seja mais eficaz nos minerais de quartzo e por conseguinte, nos arenitos do que nos calcários.

A Tabela 2.1 faz uma síntese de alguns dos principais acontecimentos ao longo do tempo da utilização de silicatos de etilo tanto como produto de conservação, numa fase inicial como produto de consolidação de material pétreo, mais recentemente.

Tabela 2.1 – Cronologia da evolução do uso de silicatos de etilo pela comunidade científica

Ano	Acontecimento
1824	Primeira referência a um produto composto por silicatos de etilo
1861	Primeira sugestão de um silicato de etilo como consolidante para rochas
1930	Utilização de silicatos de etilo para pintura e proteção de pedras utilizadas em monumentos
1956	É referido com o melhor agente de endurecimento para aplicação em pedras areníticas e calcárias
1959	Primeira patente de hidrófugos baseado em silicatos de etilo
1971	Primeira distinção entre pedras areníticas e calcários, evidenciando-se os primeiros com melhores resultados
1973	Começam a surgir trabalhos utilizando os produtos consolidantes Wacker e Tegovakon
1978	Primeiros estudos sobre o gel formado durante a reação de condensação e a sua retração
1991	Estudos confirmavam melhores resultados em arenitos do que em rochas calcárias

2.3.2 Formulação química de silicatos de etilo

As principais razões para esta escolha de alcoxisilanos no tratamento de rochas através de processos de consolidação prendem-se com duas propriedades que são largamente referidas: a sua baixa viscosidade e a facilidade em formar ligações Si-O. A baixa viscosidade permite que o líquido penetre facilmente na rede interna da estrutura das rochas enquanto as ligações Si-O são ligações relativamente fortes que se formam devido à facilidade dos átomos de oxigénio em quebrar a ligação Si-Si, que é mais fraca (Mosquera et al. 2009). Apesar destas propriedades serem vantajosas para os produtos de consolidação de rochas, é necessário perceber de que forma é que os alcoxisilanos se transformam em géis e de que forma é que este processo decorre, em que condições e porque razão é que este gel tem tendência para fraturar no interior dos poros.

A nomenclatura dada a compostos de sílica tem como nome principal o silano, SiH_4 , que é análogo ao metano (CH_4) mas derivado de silício em vez de carbono, precedida por um prefixo numérico (di, tri, tetra, etc.) que corresponde ao número de átomos de sílica na molécula. Assim temos disilano, Si_2H_6 , trisilano, Si_3H_8 , etc.

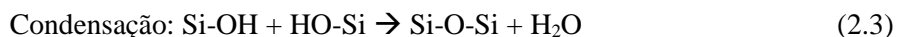
A polimerização dos consolidantes baseados em sílica inicia-se com uma reação de hidrólise e consequente processo de condensação para formar gel de sílica (SiO_2) e etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$) da seguinte forma:



Esta reação química desenvolve-se quando o consolidante entra em contacto com a água presente nos poros do material, originando a separação da molécula de água que é substituída por um grupo hidroxilo (OH). Desta reação do silicato de etilo formam-se etanol e silanol (como o álcool etílico, por exemplo).



Quando o silanol, ou álcool, sofre desidratação, ocorre a precipitação de gel de sílica no interior dos poros, e nesta fase também o etanol vai evaporando sucessivamente. Os silanóis podem reagir entre si formando ligações Si-O numa reação de condensação. Desta reação forma-se como produto da reação um gel de sílica.



O processo termina quando ocorre a evaporação do solvente, originando a formação do gel de sílica amorfa. É nesta fase de secagem que ocorre a fissuração deste gel. Mosquera et al., (2009) justificam a ocorrência deste fenómeno como resultado da evaporação do solvente, que cria uma interface líquido-vapor no interior daquelas fissuras, criando um menisco côncavo. A existência deste menisco forma um diferencial de pressão capilar, que resulta na retração da estrutura do gel de sílica, provocando a sua fissuração.

2.3.3 Formulação comercial do silicato de etilo

Desde o início da era da consolidação no universo da conservação de monumentos e outras estruturas de cariz histórico ou cultural, que foram surgindo marcas comerciais de produtos com características que promovem a coesão interna de rochas de origem natural. São várias as referências feitas a produtos consolidantes ao longo desta dissertação, como os produtos da Wacker (Wacker OH, H), os produtos da Keim (Keim OH e H) e os produtos da T. Goldschmidt (Tegovakon V e T), entre outros. Este último é o fabricante do consolidante utilizado na componente experimental desta dissertação.

O produto Tegovakon V, fornecido pela firma *BIU International* é um silicato de etilo constituído por ortosilicato de tetraetilo [$\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$] e trata-se de um silano constituído por cadeias longas ligadas entre si, com uma estrutura reticulada, através de ligações sílica-oxigénio (Si-O) e grupos alcoxi. Tegovakon V é a versão consolidante (equivalente aos restantes produtos comerciais OH), diluída em *white spirit*, e o Tegovakon T é a versão hidrofóbica equivalente aos produtos H. A

formulação contém 34 % de solventes, onde 17 % é nafta, que é um derivado do petróleo, não solúvel em água e com mais toxicidade que os restantes solventes devido aos componentes aromáticos e os restantes 17 % correspondem a etanol, ou álcool etílico. Na formulação impressa na sua ficha técnica é referido que possui uma massa volúmica de 0.95 g.cm^{-3} a 25°C .

2.3.4 Métodos de aplicação do consolidante

O processo de consolidação envolvendo aplicação de produtos contendo silicatos de etilo provou que são os que melhores resultados tiveram em tratamentos de rochas naturais principalmente em rochas areníticas, comparativamente às calcárias, mármore ou rochas argilosas (Wheeler, 2005). Por não se tratar de um processo normalizado, muitos têm sido os trabalhos com diferentes tipos de aplicações de consolidantes, sendo os principais as aplicações por pincelagem, pulverização, absorção por capilaridade (imersão parcial), absorção através do revestimento recorrendo a compressas ou absorção por imersão total.

Um dos principais desafios deste processo é a realização duma análise ao efeito da ação da consolidação pois esta é altamente condicionada por diferentes fatores de natureza interna do material, como sejam a sua composição, porosidade, porometria e tipo de rede intergranular, ou de natureza externa, que diz respeito ao tipo de consolidante e as suas propriedades e ao processo de aplicação deste, como o tipo e as condições de aplicação, já referidas, e condições de cura. Pinto & Rodrigues (2008) defendem a existência duma interdependência entre a rocha e o tratamento a aplicar e que, para além do produto usado, depende também da metodologia de todo o processo. Produto, solvente e concentração são parâmetros já bem desenvolvidos em vários trabalhos de investigação, enquanto a influência nos resultados do tipo de aplicação e do tempo de contacto suscitam mais dificuldades em termos comparativos.

A análise do efeito da consolidação pode ser realizada recorrendo a diferentes métodos como sejam: as alterações de propriedades do material, sejam físicas (alteração de cor, aparecimento de manchas), mecânicas (variação de resistências) ou químicas (aparecimento de gel de sílica nas interfaces tratadas), quantidade de produto absorvida ou profundidade de penetração do consolidante. Tendo em conta que um tratamento por ação de um consolidante é um processo que promove um aumento de resistência mecânica, a avaliação da ação consolidante terá de ser realizada através de métodos de análise a esta alteração como a resistência à perfuração em profundidade, resistências à tração por flexão e à compressão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons (Pinto & Rodrigues, 2008).

Rodrigues et al. (2002) estudaram vários tratamentos consolidantes através da determinação da profundidade de penetração aplicando um silicato de etilo (Tegovakon V), e duas resinas acrílicas (Paraloid B-72 e ACS 2001) por pincelagem, até aparente saturação, e capilaridade. Concluiu-se,

através de um método de determinação da dureza superficial, que os resultados nos tratamentos realizados por pincelagem e por imersão foi semelhante, o que indica que o método de aplicação utilizado não influenciou o processo, dependendo principalmente do produto consolidante utilizado. Este estudo permitiu concluir que, de uma forma geral, o mesmo produto aplicado através de métodos diferentes origina ações consolidantes diferentes, por se ter quantidades absorvidas diferentes em cada situação.

Muitos estudos variam na forma como tratam os provetes, em laboratório, e os trabalhos neste campo da consolidação usam uma conjugação de variáveis, entre o método de aplicação e o tempo em que o consolidante está em contacto com o objeto de tratamento. O processo de absorção por capilaridade é frequentemente utilizado. Por exemplo, Tabasso & Santamaria (1985) usaram absorção por capilaridade durante vinte horas, enquanto De Witte et al. (1985) aplicaram o mesmo método durante 15 minutos apenas, não existindo uma guia de uma correta utilização durante o processo.

É possível verificar que os resultados de um processo com tratamentos de rochas naturais através de recurso a consolidantes é favorável e garante melhoria das características mecânicas e físicas das rochas; no entanto existem sempre variáveis que influenciam fortemente os tratamentos. Continua a ser ambíguo o processo que garante melhores resultados, ou o consolidante que fornece mais garantias para cada tipo de rocha, no entanto através do trabalho de Pinto & Rodrigues (2011) foi proposto um protocolo para um método *standard* de avaliação da eficácia do consolidante em rochas carbonatadas onde defendiam que a aplicação por absorção por capilaridade consistia no método mais facilmente reproduzível e que devia ser considerado como método-padrão para avaliação em condições de laboratório.

2.3.5 A introdução de resinas sintéticas como aditivo a consolidantes

Como se pode verificar o desenvolvimento dos alcoxissilanos tem sido crescente, com um elevado número de publicações sobre este tipo de consolidantes e a tendência é que se continue a desenvolver novas formas de abordagem e novos processos de tratamento de rochas. Desde a segunda metade do século XX, têm sido feitas abordagens com o objetivo de desenvolver a eficácia dos consolidantes baseados em silicatos de etilo e outros. Esta evolução resulta das lacunas que são frequentemente salientadas, como são a tendência do gel de sílica que se forma a fraturar no interior das rochas quando existe retração na fase de secagem ou do fraco desempenho em pedras carbonatadas. A alternativa consistiu em incluir um tipo diferente de aditivo que garantisse uma modificação nas propriedades elásticas do gel de sílica, obtendo-se uma redução significativa na fratura do mesmo, através de polímeros acrílicos e metacrilatos, co-polímeros acrílicos e vinílicos (Marques, 2008).

Estas resinas sintéticas, apesar de apresentarem boas características de endurecimento (Selwitz, 1992; Rossi-Manaresi, 1981) possuem a capacidade de acrescentar uma coloração amarelada quando expostas a radiação ultravioleta (Saleh et al., 1992).

Wheeler et al., (1991) descobriram, na altura, que a mistura de MTMOS e a resina acrílica (Paraloid B72) exibiu um abrandamento significativo da polimerização do consolidante, promovendo a sua evaporação.

Saleh et al., (1992) estudaram o efeito da consolidação num arenito através da aplicação de vários tipos de compostos (MTMOS e TEOS) e a junção de resina acrílica (Paraloid B72) nestes e de forma isolada. A alta viscosidade desta resina faz com que não seja apropriada para tratamentos de consolidação quando aplicada isoladamente, mas ao ser dissolvida com os compostos de sílica, e devido às semelhanças das suas propriedades, resulta em aumentos de resistência mecânica.

Mais recentemente, um aditivo designado por PDMS-OH (polidimetilsiloxano) que consiste em segmentos lineares flexíveis que fazem a “ponte” entre a rede do consolidante, reduzindo a fratura do gel e tornando-o mais resistente às tensões causadas pela pressão capilar (Zárraga et al., 2010).

Zárraga et al., (*op.cit.*) estudaram a utilização deste produto híbrido, também conhecido como silicato organicamente modificado (ORMOSILs), onde testaram o seu efeito comparando amostras não-consolidadas, amostras consolidadas com silicato de etilo através de pulverização até aparente saturação e adicionando PDMS ao consolidante. Concluíram que o uso de PDMS-OH como aditivo ao silicato de etilo origina uma fase mais elástica do gel no interior dos poros, diminuindo a sua fissuração, enquanto a viscosidade praticamente não teve alteração. Resultados semelhantes foram observados no trabalho de Luo et al., (2015), onde a mesma redução na fratura do gel foi observada, aliada a um endurecimento da superfície, e tendo sido aplicado através de pincelagem. No entanto, observou-se uma ligeira redução da profundidade de penetração quando adicionado PDMS ao consolidante, o que leva a concluir um ligeiro aumento de viscosidade.

Pode-se considerar que os produtos consolidantes mais utilizados no tratamento de rochas carbonatadas são baseados em silicatos ou são resinas, principalmente acrílicas. No entanto, existem certos casos em que o consolidante não tem o efeito desejado. Em rochas puramente carbonatadas, os produtos baseados em silicatos não são considerados uma boa solução devido à sua incompatibilidade química, não havendo reação no momento de formar as ligações necessárias para completar a consolidação. Dentro deste contexto, os consolidantes baseados em cal são considerados quimicamente compatíveis com a calcite, formando ligações que permitem o endurecimento do sistema. As nanocais representam partículas com uma dimensão média de 150 nanómetros, com alta capacidade de penetração na rede interna. Costa & Rodrigues (2012) estudaram o uso de nanopartículas de hidróxido de cálcio para avaliar a capacidade de impregnabilidade e os seus resultados como efeito consolidante em diferentes rochas

carbonatadas obtendo um aumento de resistência superficial; no entanto a migração de produto para o interior da amostra ficou aquém do esperado, observando-se a absorção principalmente de solvente, acumulando-se uma grande quantidade de nanopartículas na base da amostra.

Em suma, um tratamento de consolidação pretende aumentar a coesão dos elementos pétreos em toda a sua profundidade de ação, através da alteração da sua microestrutura, induzindo nestes uma redução da porosidade e promovendo um aumento de resistência à degradação causado pelo meio ambiente, tanto em termos físico-mecânicos como químicos. (Marques 2008)

A presente dissertação tem como objetivo estudar o efeito da consolidação de um material arenítico. A Tabela 2.1 apresenta um conjunto de propriedades avaliadas em materiais com características semelhantes, seja em composição, porosidade, método ou tempo de aplicação, antes e após o tratamento com produtos consolidantes à base de silicatos de etilo.

Tabela 2.2 Descrição de diferentes provetes em arenito, tipo e aplicação de consolidante e o seu efeito na porosidade e na resistência em compressão uniaxial

Referência	Características dos provetes de arenito			Aplicação do consolidante			Porosidade (%)		RCU (MPa)	
	Origem	Dimensões (cm³)	Composição mineralógica	Produto	Firma	Método	NT	T	NT	T
Rossi-Manaresi (1976)	Palácio Zacchia (Bolonha, Itália, Séc. XV)	4 × 4 × 4	30 – 46 % cimento carbonatado	Tegovakon V	Goldschmidt	Imersão	24,7	-	24,9	27,60
Zinsmeister et al. (1988)	Massillon (Ohio, USA)	5 × 5 × 5	Quartzo e vestígios de óxido ferro e sílica	Conservare OH	Wacker Chemicals	Imersão	24	22,20	16,80	31
Saleh et al. (1992)	Templo de Karnak (Egito, 2200 a.C.)	5 × 5 × 5	65 – 90 % Quartzo 8 % Feldspato	Wacker OH	Wacker Chemicals	Pincelagem	-	-	9,80	15,70
Tiano et al. (2000)	Sander (Alemanha)	5 × 5 × 5	89 % Quartzo 9 % Feldspato 2 % Mica	Strengtheners OH	Wacker Chemicals	Absorção por capilaridade	19,20 ± 0,80	9,20 ± 0,30	52,3 ± 11	71,50 ± 12
	Wustenzeller (Alemanha)	5 × 5 × 5	82 % Quartzo 14 % Feldspato 2 % argila	Strengtheners OH	Wacker Chemicals	Absorção por capilaridade	12,40 ± 0,30	4,90 ± 0,30	83,6 ± 18,70	101,60 ± 17,60
Watsantachad (2001)	Tailândia	5 × 5 × 5	40-50 % Quartzo 10-25 % Feldspato	Conservare OH	Wacker Chemicals	Absorção por capilaridade	12,78	3,63	13,90-15,90	27-27,30
Marques (2008)	Atouguia da Baleia (Portugal)	5 × 5 × 5	45-51 % Quartzo 20-21 % Carbonatos (calcite e dolomite)	Tegovakon V	Goldschmidt	Capilaridade + imersão	18,40	-	30,90 ± 1,50	48,10 ± 2,30
Mosquera et al. (2009)	Sudeste de Espanha	5 × 5 × 5	50 % cimento de calcite Grãos de quartzo e feldspato	Tegovakon V	Goldschmidt	Pincelagem	28,92 ± 3,50	21,39 ± 3,20	109	124
Sassoni et al. (2013)	Tuscania (Itália)	5 × 5 × 5	Presença dominante de calcite e vestígios de quartzo	TEOS	CTS, Italy	Pincelagem	21,49	17,46	4,10	5,40

Capítulo 3 - Caso de estudo: O forte da Praia do Pessegueiro

3.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como objetivo fazer o enquadramento ambiental, analisando os parâmetros geológicos e climáticos onde se insere o Forte da Praia do Pessegueiro, uma construção de património cultural em material arenítico. Pretende-se igualmente contextualizar o edificado em relação às suas características construtivas e intervenções realizadas sobre o mesmo, bem como o seu estado atual de conservação, identificando os principais mecanismos de degradação observados.

3.2 Enquadramento geológico

O Forte da Praia do Pessegueiro, situado numa plataforma pouco elevada sobranceira ao mar, é uma fortaleza construída nos finais do séc. XVII na orla litoral do Sudoeste Alentejano, a partir de um arenito local de origem eólica – eolianito.

Segundo documentos obtidos da ex-DGEMN (Direção Geral dos Edifícios e Monumentos Nacionais), atual Instituto da Habitação e Reabilitação Urbana (IHRU), a zona do forte é importante do ponto de vista arqueológico porque dentro de uma área de 2 km em redor ocorrem testemunhos de diferentes épocas da ocupação humana (ex-SNPRCN, 1988): Paleolítico (Arribas do Forte do Pessegueiro); Mesolítico (Samouqueira e Vidigal); Neolítico (Vale Vistoso e Vidigal); Idade do Cobre (Herdade do Pessegueiro e Monte da Ilha); Idade do Ferro e Romana (Ilha do Pessegueiro). O eolianito está representado ao longo do litoral ao Sul do Cabo Carvoeiro ocorrendo, segundo Ramos (2010), em diferentes posições geomorfológicas como as plataformas continental ou litoral, algumas praias, sobre arribas baixas ou em vales abrigados e data de diferentes fases do Quaternário (Pleistocénico Médio e Superior e Holocénico) (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Posições geomorfológicas do eolianito na região local

Região	Local	Plataforma Continental	Plataforma litoral	Praia	Arriba
LITORAL ALENTEJANO	S. Torpes				•
	Morgavel	•	•		
	Porto Covo				•
	Pessegueiro	• (Forte da ilha)	•		• (Forte da praia)
	Aivados			•	•
	Malhão		•		•
	Vila Nova de Milfontes	•		•	
	Zambujeira do Mar			•	

A Figura 3.1 mostra a presença do eolianito ao longo do excerto do litoral alentejano apresentado, elaborado com recurso a imagens de satélite onde é possível fazer a distinção entre este tipo de rocha e outro bastante abundante – xisto.

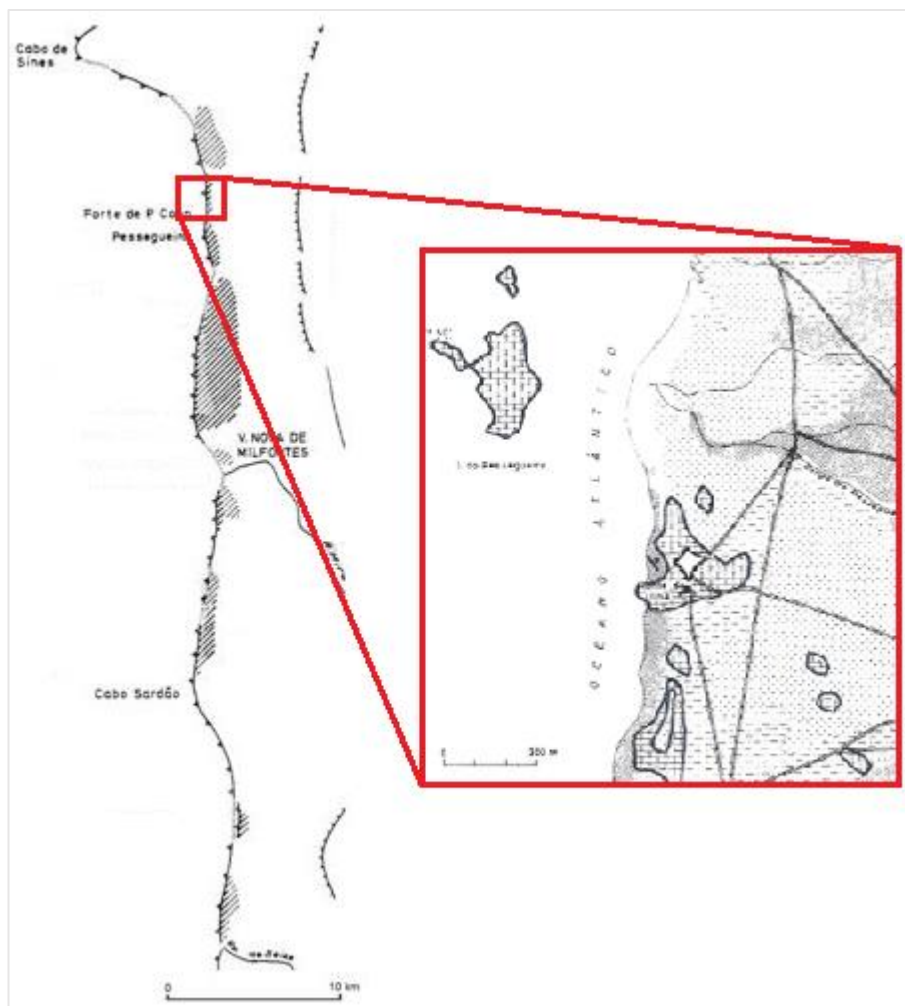
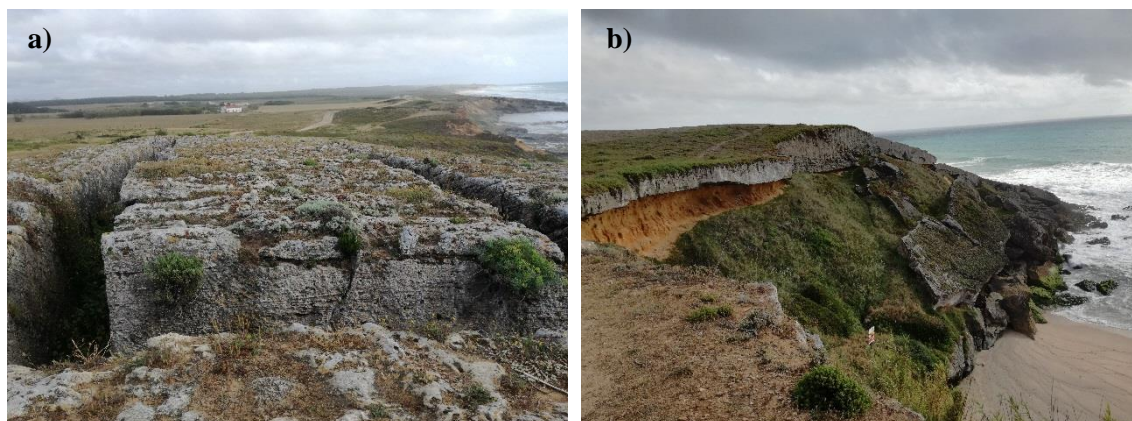


Imagem adaptada de Pereira, 1985

Figura 3.1 Vestígios da localização do eolianito ao longo do litoral alentejano

As rochas que formam a plataforma sobre a qual o forte foi construído são arenitos carbonatados, acumulados eolicamente com uma estratificação bem definida e cujos componentes fundamentais, segundo Carvalho & Romariz (1973), são o carbonato de cálcio (cerca de 79,4 %), detritos terrígenos arenosos (19,5 %) e argila em pequena percentagem (0,9 %). As duas frações com maior representatividade tiveram a sua origem nas areias de praia, contendo a fração organoclástica fragmentos de conchas, responsável pelo grau de cimentação das dunas, através da calcite proveniente da dissolução daquelas e posteriormente precipitada por entre os grãos de areia, possibilitando o aproveitamento dessas dunas como material de construção.

O forte foi edificado sobre esta bancada de arenito, que abunda nesta faixa costeira, a cerca de 20 metros acima do nível do mar. A pedra para a sua construção foi, ou aproveitada de uma antiga fortificação já existente no local, ou extraída localmente, numa pedreira (Figura 3.2a) que pode ser observada a algumas dezenas de metros a sul do monumento. Na base da arriba, mais próximo do mar, podem ver-se xistos luzentes, interrompidos por filonetes quártzicos e sobre estas rochas do Carbónico do Alentejo, sobrepõem-se areias de cor avermelhada, ricas em argila (Figura 3.2b).



a) Pedreira localizada a poucos metros do forte, a sul deste; b) Bancada de arenito onde o forte assenta sobre estrato de areias argilosas

Figura 3.2 – Presença do eolianito nas imediações do forte

Este arenito dunar mal compactado é contemporâneo de plataformas arenosas, atualmente submersas e mais largas do que a praia atual e cimentado com o carbonato de cálcio proveniente da dissolução das conchas. Estas são a principal fonte de CaCO_3 para a cimentação de arenitos dunares noutros pontos da costa portuguesa e outros litorais do mundo. O grau de compactação deste arenito depende de vários fatores intrínsecos e extrínsecos. O teor em conchas e a porosidade das areias são importantes para a avaliação da compactação do arenito: quanto maior for o teor em conchas maior será a presença de carbonato de cálcio e mais cimentada será a rocha, enquanto a porosidade controla a presença de água, a qual pode apresentar diferentes graus de agressividade consoante a sua proveniência. Este arenito está sujeito à presença de água de diferentes origens, seja da precipitação (água doce) ou dos nevoeiros salinos provenientes do mar (água salgada). Estes são fatores de deterioram as ligações cimentícias, através da saturação dos vazios, existindo uma exportação de soluções ricas em carbonatos para o exterior, reduzindo a coesão entre os componentes do arenito (Pereira, 1987).

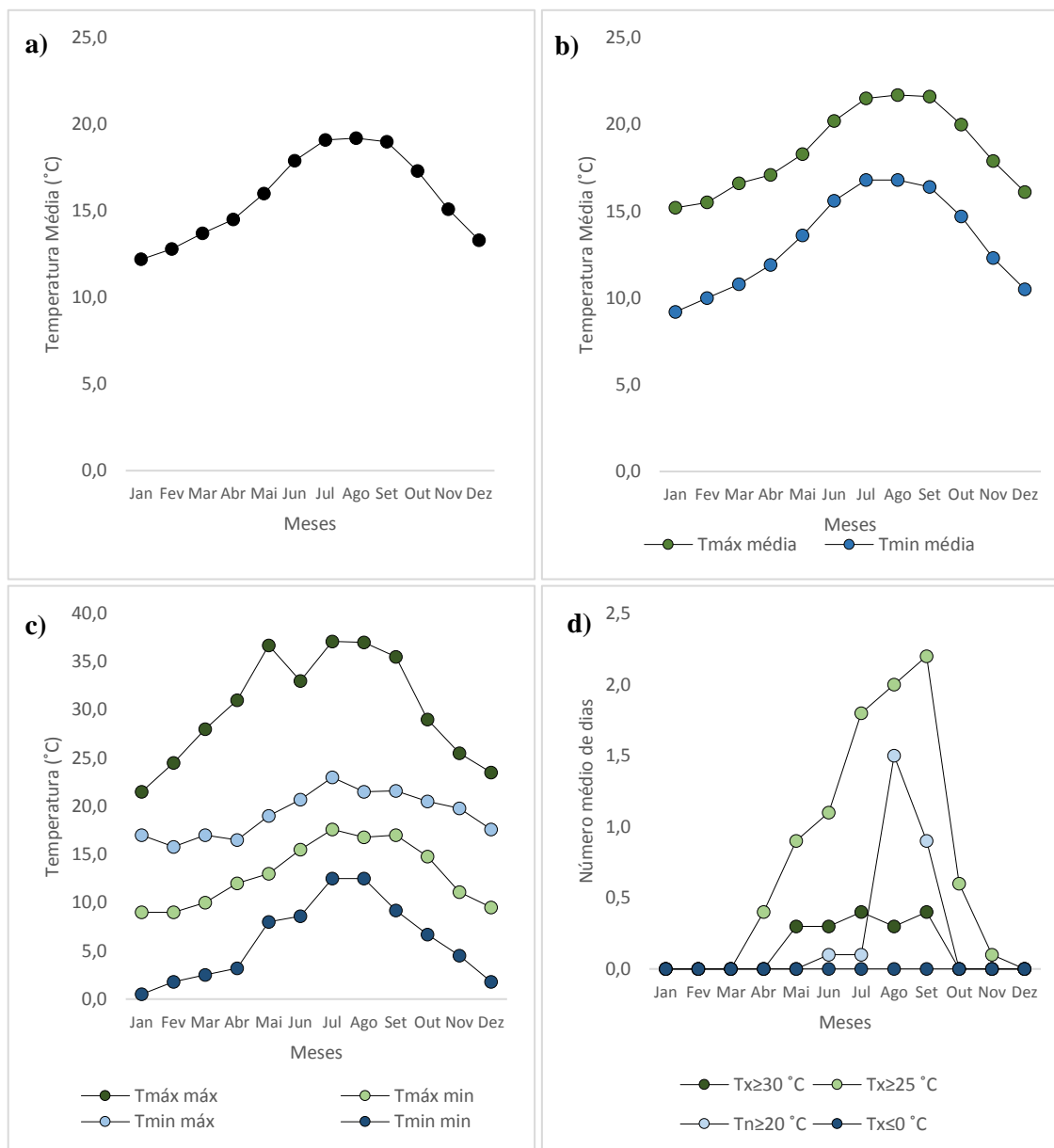
3.3 Enquadramento climático

O enquadramento climático desta zona foi realizado tendo em conta os registos obtidos pela estação meteorológica de Sines (Latitude: 37°57'N; Longitude: 08°53W), que está integrada na rede do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) e que constituem as normais climatológicas referentes ao período intercalar 1971-2000 (referentes às últimas disponíveis). Estas normais climatológicas forneceram os valores mensais e anuais dos principais elementos climáticos, na forma gráfica e numérica. São igualmente apresentados os valores médios da temperatura máxima e mínima do ar e os totais de precipitação, assim com os respetivos valores extremos. Os dados fornecem ainda informação de parâmetros como a velocidade do vento, insolação, evaporação, humidade relativa e o número médio de dias com trovoadas, granizo, neve, nevoeiro ou geada, sendo apenas relevantes para o presente estudo os valores de nevoeiro.

O resultado destas últimas normais climatológicas permitiu identificar, segundo a classificação de Köppen-Geiger, que o tipo de clima presente na zona litoral oeste do Alentejo e Algarve, onde se encontra situado o forte, é Temperado do tipo C, encontrando-se abrangido por dois subtipos: clima temperado com verão quente e seco / seco e suave.

Esta estação dista cerca de 15 km do forte da ilha do Pessegueiro sendo a estação meteorológica mais próxima. Pelo facto de se situar igualmente na margem costeira pode-se assumir que aqueles resultados não variam muito para uma zona que se encontra 15 km, em linha reta para sul.

Os registos do parâmetro temperatura na série 1971-2000, expressos em grau Celsius, são apresentados na Figura 3.3. A amplitude térmica registada foi de 7 °C, onde a temperatura máxima registada foi de 37 °C e a mínima de 0,5 °C, não se tendo registado valores negativos de temperatura no período considerado.



a) Temperaturas médias diárias; b) Médias mensais das temperaturas máximas e mínimas diárias; c) Maiores e menores valores das temperaturas máximas e mínimas diárias; d) Número médio de dias onde Tx (temperatura máxima do ar) e Tn (temperatura mínima do ar)

Figura 3.3 - Registos da temperatura (°C) referente ao período de 1971/2000

Na Figura 3.4 são apresentados os registos médios de precipitação relativos ao período 1971-2000.

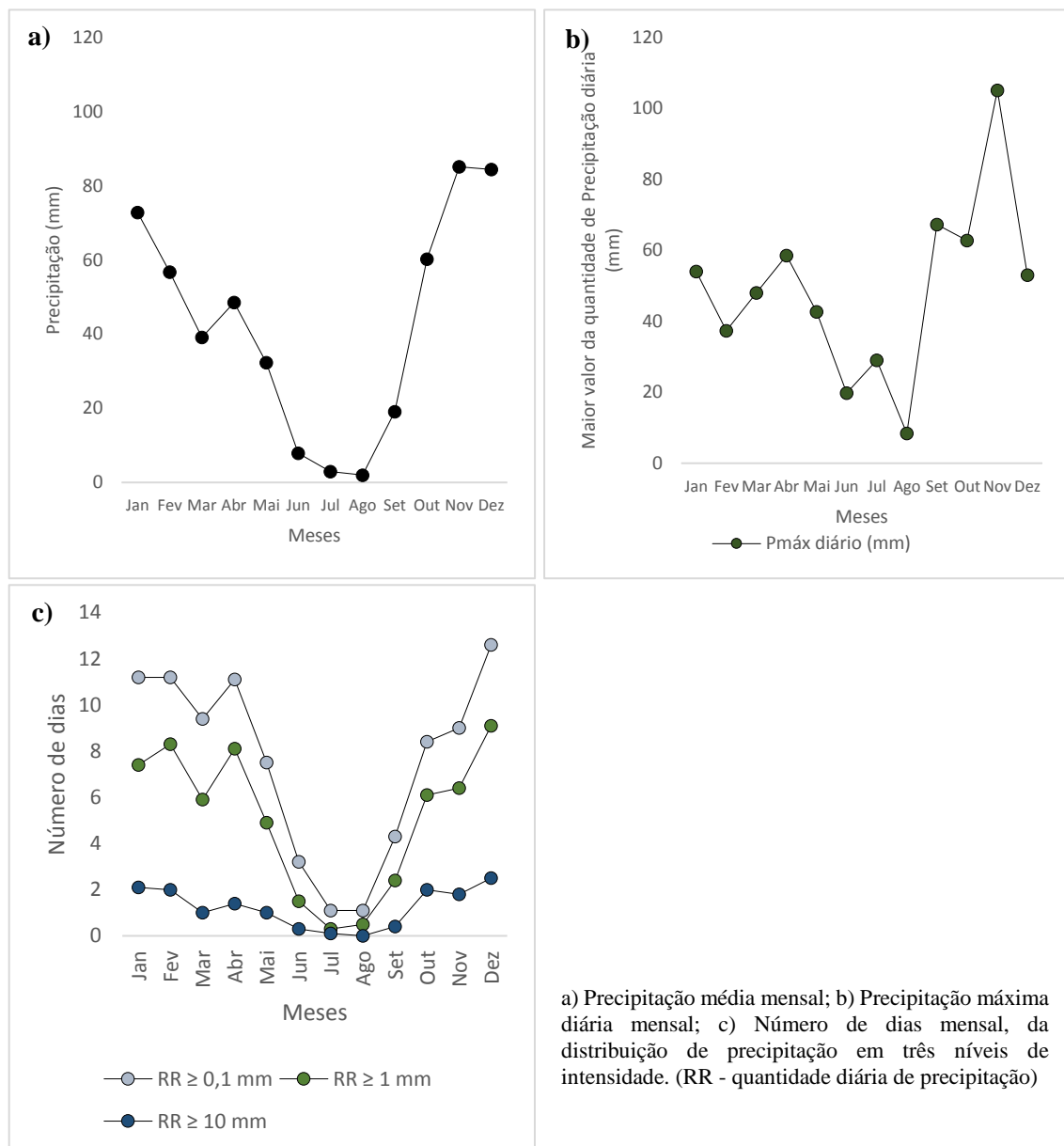
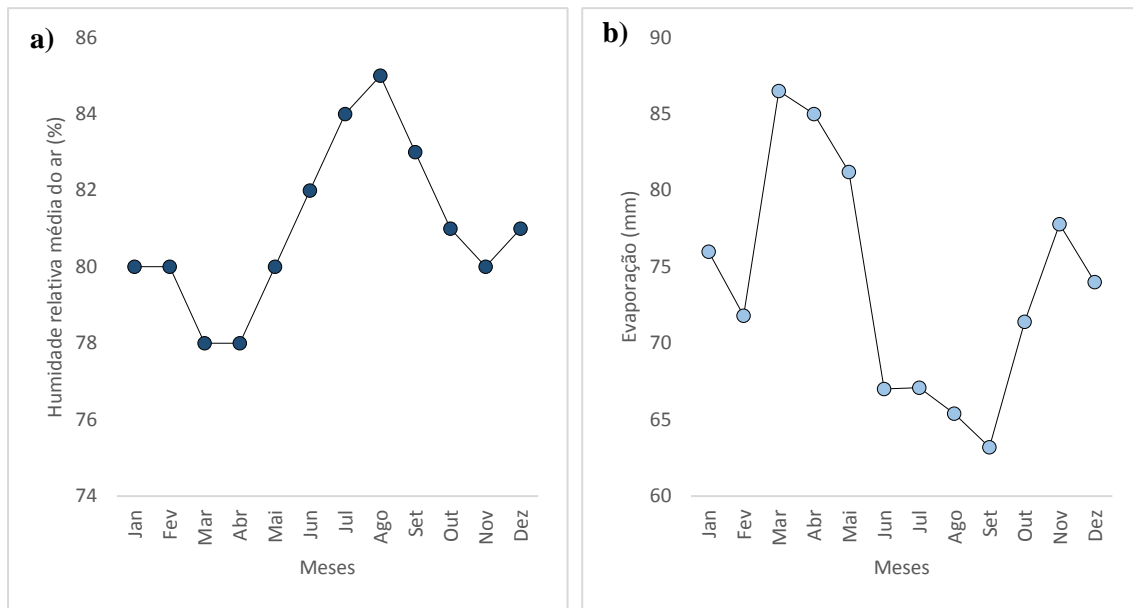


Figura 3.4 - Registos de precipitação (mm) referentes ao período 1971/2000

Na Figura 3.5a constata-se que a humidade relativa (HR) registada pela estação está compreendida entre 78 e 85 % para o período considerado. Os meses mais húmidos foram os de julho a setembro, sendo os meses de março e abril os que registam os valores mais baixos. Na Figura 3.5b observa-se a quantidade de evaporação, expressa em mm, medida a partir da altura de água evaporada de um recipiente cilíndrico de eixo vertical, aberto para a atmosfera, tendo sido obtidos com um evaporímetro de Piche. Os meses de maior evaporação correspondem aos meses de menor HR e o contrário também se verifica.



a) Humidade Relativa (%) do ar registada às 9h; b) Evaporação (mm) medida através da altura de água evaporada de um recipiente aberto e registado às 9h e nas 24h precedentes

Figura 3.5 - Médias mensais de HR e evaporação

O número de dias de nevoeiro é apresentado na Figura 3.6. Os valores mais altos registam-se entre julho e setembro, com cerca de quatro dias de nevoeiro, sendo que nos meses de janeiro a maio e novembro/dezembro registou-se cerca de meio dia.

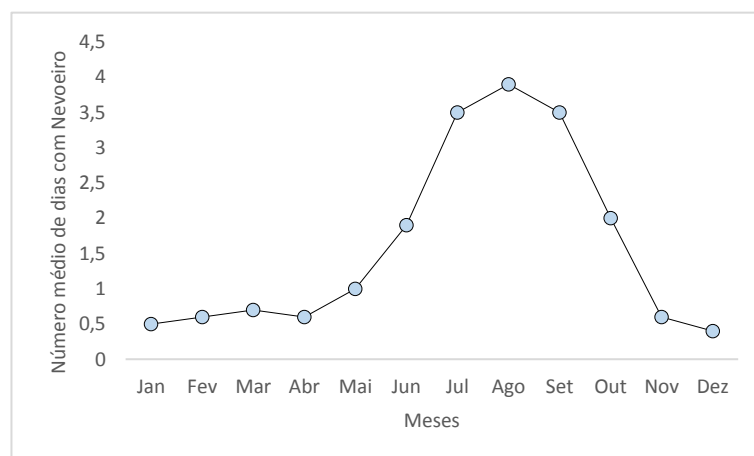
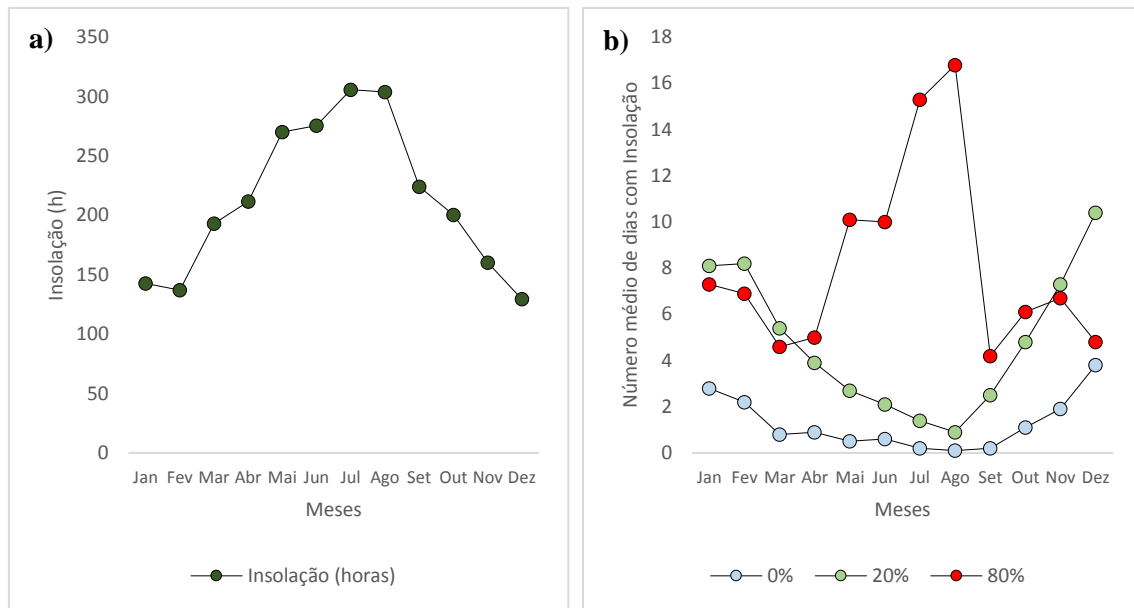


Figura 3.6 - Número médio mensal de dias com nevoeiro referentes ao período 1971-2000

A insolação é medida em número de horas de Sol com céu limpo e acima da linha do horizonte e os dados são apresentados na Figura 3.7.



a) Insolação média mensal (h); b) Número médio de dias com insolação em três níveis de intensidade

Figura 3.7 - Registos da insolação referentes ao período 1971/2000.

O parâmetro climático referente à velocidade do vento é representado na Figura 3.8 onde se mostram as velocidades médias mensais, os registos de números de dias com ventos fortes e muitos fortes, respetivamente 60 e 80 km/h e a predominância dos ventos em relação aos rumos. Constatou-se que foi registada uma velocidade média anual de cerca de 15,9 km/h, sendo que as velocidades são maiores nos meses de março a maio e diminuem nos meses de verão, principalmente no mês de setembro. Os ventos do rumo Noroeste (NO) são os mais predominantes, com velocidades que chegam aos 23 km/h no mês de janeiro. O segundo rumo mais importante diz respeito aos ventos de Norte.



Figura 3.8 - Registos da velocidade do vento (km/h) e das frequências (%) mensais e por rumos:

Este fator tem elevada importância neste caso de estudo devido ao facto de o edifício do Forte do Pessegueiro se encontrar a cerca de 12 km da Central Termoelétrica de Sines e a 15 km da Refinaria, também localizada em Sines, ambas praticamente alinhadas a Norte daquele, enquadrados com o segundo rumo mais predominante em relação à velocidade e frequência do vento (Figura 3.9).

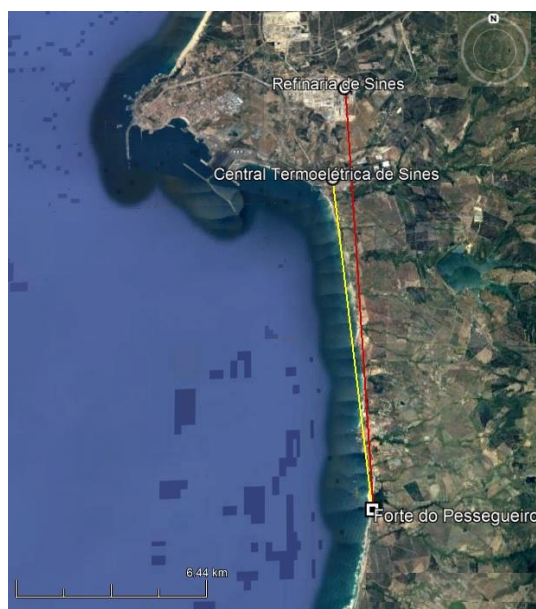


Figura 3.9 - Mapa de localização com enquadramento geográfico da Central Termoelétrica, Refinaria de Sines e o Forte do Pessegueiro (imagem retirada do Google Earth)

A Central Termoelétrica de Sines é uma das duas centrais em Portugal onde o carvão ainda é utilizado como combustível fóssil para produção de eletricidade. Foi considerada em 2014, a 27^a mais poluente entre 30 centrais europeias, num estudo organizado por várias organizações ambientais e baseado nas emissões de dióxido de carbono (CO₂), tendo produzido no ano anterior cerca de 7,18 milhões de toneladas de CO₂ (Gutmann et al. 2014). Num outro estudo, realizado pela associação ambientalista ZERO em 2015, a nível nacional, a central foi considerada a mais poluente do setor de produção de energia elétrica sendo responsável por 13,5 % do total nacional. Ainda neste ranking, a Refinaria de Sines da Petrolgal contribui com 3,9 % do total de emissões de gases poluentes, principalmente CO₂.

Estes gases que resultam da queima de combustíveis fósseis, como o carvão na Central Termoelétrica, são transportados pelos ventos predominantes de Noroeste e Norte. O CO₂ presente no ar é dissolvido na água da chuva tornando-a ligeiramente ácida. Segundo Charola (1987) a influência da chuva ácida nas construções aumenta com a presença de calcite, provocando uma reação química que tem como produtos de reação sais solúveis como os sulfatos e nitratos, responsáveis pela degradação deste tipo de monumentos construídos com pedra natural, através da sua infiltração e/ou ascensão capilar e posteriormente cristalizam no interior da pedra, provocando aumento de tensão nas paredes dos poros e consequente perda de coesão.

3.4 Historial do Forte da Praia do Pessegueiro como edifício patrimonial

O Forte dito da Praia do Pessegueiro, pertenceu à praça de fortificações de Sines (que era constituída por cinco fortalezas – Forte de São Clemente de V. N. de Mil Fontes, Forte da Praia do Pessegueiro ou da Ilha de Dentro, Forte da Ilha de Fora, Castelo de Sines e Fortim da N. Sra. das Salas) é uma estrutura militar do final do séc. XVII, cuja construção resultou do esforço da Coroa para melhorar a defesa da costa contra a ação predatória de navios corsários vindos do Norte de África. Este foi edificado sobre uma anterior fortificação, então arruinada e o seu projeto foi realizado em 1588 por Filippo Terzi (1520-1597) e continuado pela mão de Alexandre Massay, dois anos depois. De frente deste, localizado na ilha, está um outro forte, denominado de fortim da Ilha de Fora (Figura 3.10), 100 anos mais antigo e arruinado pelo terramoto de 1755. A construção do Forte da Ilha de Dentro iniciou-se em 1603, tendo sido interrompidas pouco tempo depois. Após um período em que as obras foram suspensas e reiniciadas várias vezes, apenas por volta de 1690 a obra terá sido concluída pela mão do engenheiro João Rodrigues Mouro (Quaresma 2009).

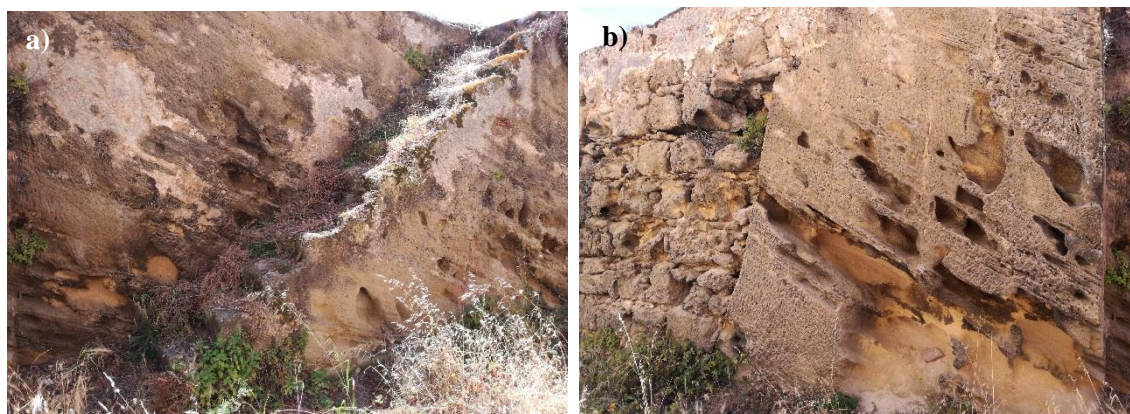


Figura 3.10 - Vista aérea da Ilha do Pessegueiro. (fonte: conheceralentejo.pt)

Após a época em que o forte teve um propósito defensivo, esta função militar terá sido perdida devido à evolução dos meios bélicos e, consequentemente, foi desguarnecido por volta de 1844, tendo sido usado como posto da Guarda Fiscal entre os anos de 1877 e 1942, altura em que foi desativado e o edificado entrou num longo período de abandono (Quaresma, *op. cit.*).

Entre agosto de 1943 e abril de 1945, o Ministério das Finanças, entidade à qual o forte estava afeto) solicita por diversas vezes à DGEMN sobre o destino que se poderia dar ao mesmo. A DGEMN informa em resposta, datada de abril de 1945, que concordava com a necessidade de classificar o edifício e informava que se estavam a “executar obras abusivamente” sem, contudo, adiantar pormenores sobre tais obras. O edifício foi classificado como Imóvel de Interesse Público em 1957.

Edificado sobre a bancada de arenito, o forte abaluartado foi construído recorrendo, em primeiro lugar à pedra existente no próprio local, remanescente de uma antiga fortificação arruinada e depois, extraída da rocha-mãe, localizada nas proximidades, a sul deste local. Decorrente da construção do fosso à volta da estrutura, aproveitou-se a pedra da escavação, como se pode observar na cortina do lado nascente ou ainda das escadas resultantes do mesmo método (Figura 3.11) (Quaresma, 2009).



a) Escadaria de acesso ao fosso; b) Contra-escarpa que delimita o fosso

Figura 3.11 - Pormenores de zonas com pedra talhada

O forte é de planta quadrangular (Figura 3.12), com dois baluartes nos vértices SE e SW, uma bateria poligonal sobre a praia, rodeado por muros em talude, intervalando com o fosso talhado. No interior, existe uma passagem com escadaria, elevada sobre o chão, ladeada por compartimentos e uma “casa de guarda”, elevando-se por cima, através de uma escadaria da mesma pedra da construção do forte, a praça baixa, ou bateria baixa, e os compartimentos do piso principal, e nos flancos desta, os quartéis, a capela, o paiol e a cozinha (Quaresma 2009).



Figura 3.12 - Vista sudeste do Forte do Pessegueiro

3.5 Estado atual de conservação do forte da Praia do Pessegueiro

3.5.1 Preocupações éticas na conservação de edifícios

A herança histórica, como os castelos, fortes, igrejas, palácios e outras estruturas, desempenha um papel importante na cultura nacional. Estas construções antigas são caracterizadas pelas paredes de alvenaria muito espessas e as pedras naturais foram os materiais mais usados na sua construção (Marques et al., 2012). A sua conservação requer um diagnóstico apropriado, exaustivo e complexo, para que seja preservada a característica mais importante neste tipo de construções: o seu estado original. Para além deste facto, a conservação e restauro das edificações antigas deve respeitar os princípios do acordo internacional citado nas Cartas de Atenas (ICOMOS, 1931), Veneza (ICOMOS, 1964) e mais recentemente na Carta de Cracóvia (ICOMOS, 2000), onde o objetivo da conservação de monumentos e edifícios históricos, estejam estes no meio rural ou urbano, deverá ser a manutenção da sua autenticidade e integridade física. Um dos principais problemas no diagnóstico é a necessidade em retirar amostras de material para fazer a caracterização física e mecânica, sem prejudicar a integridade da estrutura.

Os tratamentos de conservação e/ou restauro que pretendem salvaguardar os monumentos, quando existe um processo de deterioração pétreia que justifique promover a consolidação e/ou hidrofugação, devem respeitar os princípios gerais de uma intervenção de conservação, nomeadamente (Marques, 2008):

- Constituir uma intervenção mínima, focada nas áreas críticas de ação, executando apenas o estritamente necessário tendo em conta os objetivos a atingir;
- Promover a durabilidade, tendo em visto a finalidade do efeito interventivo perdurar no maior tempo possível;
- Preservar a autenticidade do monumento, respeitando a importância histórica que o edificado representa, assim como os seus materiais originais;
- Não devem inviabilizar futuros tratamento, ou seja, devem poder ser retratáveis, apesar da irreversibilidade de alguns processos.

Torna-se igualmente importante abordar as questões éticas que se colocam perante uma obra de consolidação ou de reforço de estruturas de alvenaria. São consistentemente mencionados os termos consolidação e reforço, ou conservação e reabilitação, sem que sejam feitas as devidas distinções. Appleton (2012) faz um paralelismo entre os termos consolidação/reforço e conservação/reabilitação, associando a quem trata do património arquitetónico uma proximidade ao ato de conservar e consolidar, apesar de reabilitar não se opor a conservar nem, a nível estrutural, reforço não se opõe a consolidação. Segundo o mesmo autor os termos reabilitação e

reforço são considerados mais abrangentes, na medida em que definem universos de ação mais amplos.

Na opinião de Appleton (2012) a conservação está associada à escolha de processos e materiais semelhantes aos que foram aplicados na construção e dependente da sua correta aplicação e utilização, enquanto a reabilitação/reforço obriga a uma análise exigente, procurando que as soluções técnicas adequadas não interfiram nos valores do edificado.

Distinguem-se então dois universos: um primeiro onde as questões éticas não se colocam, usam-se as técnicas e materiais tradicionais, ficando os princípios essenciais (autenticidade e compatibilidade) resolvidos e outro, onde a escolha pelos melhores processos e materiais a utilizar poderiam colocar em causa os anteriores princípios. No entanto, com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas, o único fator que poderia diferenciar os materiais novos dos antigos, ou seja, o tempo, já pode ser compensado com a utilização moderada de materiais complementares, não-tradicionais, que podem ter impactes positivos (Appleton, *op. cit.*).

3.5.2 Historial de intervenções de conservação realizadas no local de estudo

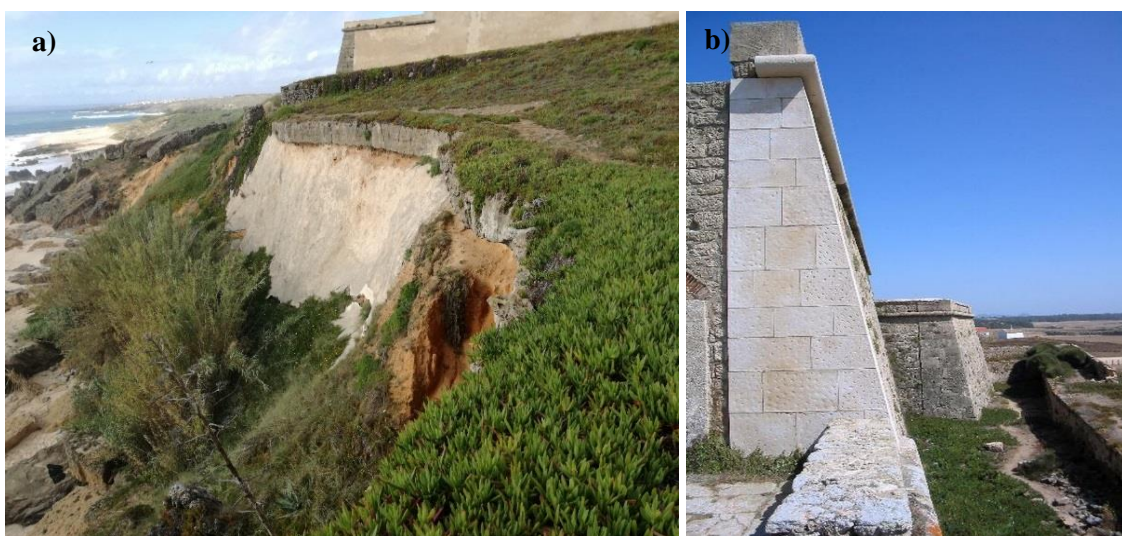
Os primeiros registos de degradação no forte, desde a sua construção datam de 1 de novembro de 1755, quando o terramoto que afetou Lisboa em larga escala, teve também influência nesta zona da costa de Sines, tendo provocado danos sobre a capela e nos dois baluartes triangulares virados a terra.

Através da consulta de documentos disponibilizados pelo IHRU, antiga DGEMN, pesquisaram-se processos referentes ao forte do Pessegueiro. Entre 1983 e 1987 foi objeto de obras de manutenção, tendo sido realizados alguns trabalhos no interior e no exterior. Em 1986, os trabalhos focaram-se nas pedras de cantaria, tendo sido fornecidos calcário “moca-creme” (DGEMN, 1986) para a construção de pilar-cunhal na elevação de paredes envolventes da escada de acesso ao terraço superior e para o completamente das guardas do terraço. Foi também fornecida “pedra cinzenta” para os degraus do segundo lance de escadas que dão acesso ao terraço (*ibid.*)

A moca-creme é um calcário bege, grosseiramente calcioclástico e abundantemente bioclástico, utilizado na grande maioria em revestimentos interiores. A pedra moca-creme mais comum apresenta uma porosidade aberta de cerca de 8,5 %, podendo descer aos 4 % nas variedades mais duras (LNEG, 2018).

Em 1987 foram realizadas obras de recuperação nas alvenarias do muro exterior, para além da continuação dos trabalhos no forte. Foi executado o cordão em falta no terraço superior e completado o processo das guardas e o refechamento das juntas nestas.

Os registos posteriores datam apenas de 2008, num projeto da DGEMN e fiscalização a cargo do município de Sines, com a duração de 4 meses, tendo o forte e os terrenos envolventes sido sujeitos a obras de reforço estrutural que consistiram na contenção e defesa da arriba (Figura 3.13 a), onde aquele está assente, e na recuperação do conjunto arquitetónico. O reforço foi realizado em tetos, paredes, pavimento e terraços e na recuperação das fachadas através da limpeza, remoção de infestação biológica, tratamento e conservação de cantarias, cunhais, cordões, coroamento de parede e tratamento de juntas. Os trabalhos foram supervisionados por uma equipa do departamento de Gestão de Áreas Classificadas do Parque Natural do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina (PNSACV), que teve ênfase nas questões ambientais onde o edificado está inserido. Um dos trabalhos mais importantes foi referente ao reforço de um dos cunhais (Figura 3.13 b), realizado com a inclusão de varões metálicos com elevada aderências com recurso a uma carotadora, seguido de selagem dos furos com injeção de calda no seu interior.



a) Contenção da arriba; b) Reforço de um cunhal do primeiro piso do forte

Figura 3.13 - Obras de contenção e reforço realizadas em 2008.

Uma das intervenções realizadas, e aquela que teve maior impacto visual foi o preenchimento entre cunhais por um reboco, sobrepondo-se ao paramento arenítico, ficando apenas as pedras de cantaria talhadas e/ou emparelhadas com este material lítico descoberto (Figura 3.14).



Figura 3.14 - Resultado das obras de tratamentos da entrada principal evidenciando as diferenças entre o paramento de arenito à vista e após ter sido rebocado

A Figura 3.15 ilustra o paramento do forte localizado a sudeste após as obras de conservação.



Figura 3.15 - Aspeto do paramento do baluarte virado a sudeste antes e após as obras de conservação

3.5.3 Mecanismos de degradação observados

A inspeção visual aos diferentes paramentos do edificado construído na praia do Pessegueiro constituiu a forma de análise ao estudo da patologia dos diferentes elementos pétreos e não-pétreos que caracterizam o forte em si e a muralha envolta deste. Através desta abordagem foram detetadas evidências de degradação das pedras de arenito e dos rebocos que o cobrem parcialmente. Em ambos resultaram formas de contaminação de elementos estruturais, através de manifestações de alteração de cor, intrusões biológicas ou fenómenos de alveolização nos paramentos.

Todas as formas de degradação mencionadas obedecem à da terminologia utilizada em ICOMOS & ISCS (2008) e Henriques (2005).

O resultado da inspeção realizada no forte permite afirmar que a maior área de degradação está concentrada entre os cunhais de pedra, na zona rebocada. Estas zonas originalmente amareladas, decorrentes das últimas obras de conservação realizadas, apresentam um estado de degradação relevante e onde é possível observar alteração de cor, com o aparecimento de zonas escuras e esverdeadas, fissuração do reboco, em várias direções e escamação/destacamento de uma camada muito superficial. A Figura 3.16 mostra o estado visual do reboco do paramento sudeste, na entrada do forte. Observa-se instalada uma colonização biológica manifestada através de fungos (de cor preta), que tem desenvolvimento desde a base até ao topo da parede. Estas ocorrências verificam-se em vários pontos do forte, em zonas expostas à incidência, escorrência e ascensão de água por capilaridade.

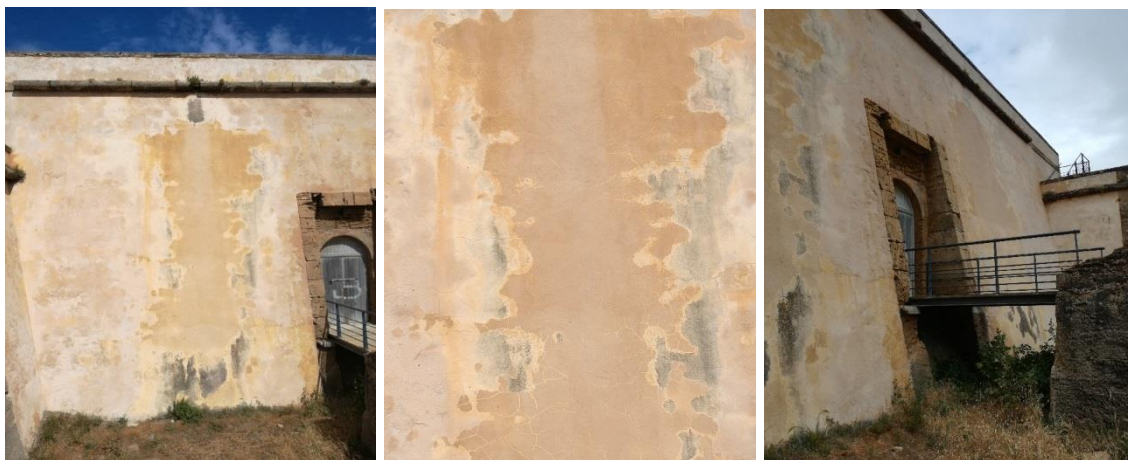


Figura 3.16- Estado atual do reboco na entrada principal do forte com manifestações de colonizações biológicas através de fungos

No paramento do forte virado ao mar, é possível observar a presença de colonizações biológicas na forma de líquenes, de cor esverdeada, para além das manchas escuras. Estas percorrem o perímetro da intrusão de fungos, causada pela ascensão de água capilar (Figura 3.17).



Figura 3.17 - Aspeto do paramento virado ao mar com ascensão de água capilar com aparecimento de fungos e líquenes

A fissuração do reboco verifica-se em toda a extensão de área conservada dos paramentos do forte (Figura 3.18). Trata-se de uma fissuração curta, fina e com desenvolvimento discreto que se pode ter originado devido à constituição do reboco aplicado, ou por retração, ou através de dilatações e contrações higrotérmicas, ou por deficiente dosagem na execução das argamassas ou aplicação de uma espessura inadequada ou ainda devido ao suporte arenítico, preenchido por elevado teor em sais.



Figura 3.18 - Paramentos da entrada principal e virado a norte com alteração de cor do reboco acompanhado de fissuração e aparecimento de manchas

A Figura 3.19 evidencia a presença biológica associada à intrusão de plantas enraizadas nas juntas das pedras aparelhadas.



Figura 3.19 - Evidências de intrusões biológicas num dos cunhais do forte

Os cunhais e os cordões horizontais, para além das muralhas, são as únicas zonas visíveis da estrutura do forte constituídos pelo material pétreo com o qual este foi construído. É possível observarem-se alguns tipos de manifestações de deterioração como a alveolização, visível através das cavidades de diferentes dimensões, algumas de desenvolvimento considerável em profundidade e outros fenómenos de erosão (Figura 3.20). Este fenómeno também pode ser observado na figura anterior.

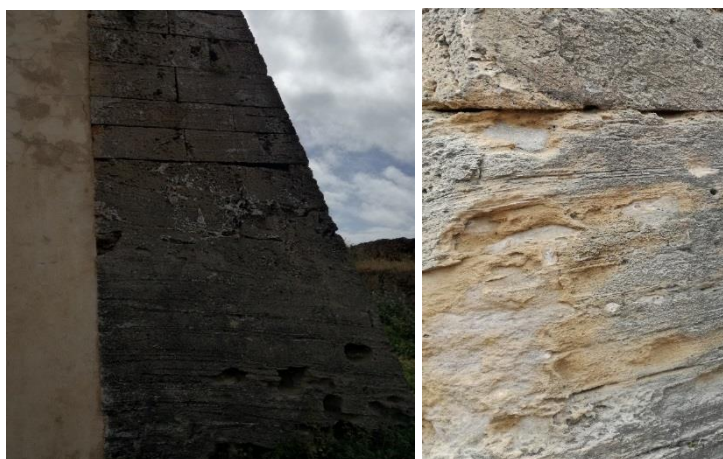


Figura 3.20 - Aspeto de alguns cunhais do forte com manifestações de alveolização e fenómenos de erosão

No muro exterior do forte, nas paredes de alvenaria de pedra virada ao mar, evidencia-se a presença de manchas esbranquiçadas, em dois locais, em zonas junto ao terreno, com desenvolvimento horizontal de cerca de cinco metros do lado esquerdo e dois metros no local mais à direita (Figura 3.21). Esta manifestação pressupõe algum tipo de teste realizado *á priori* da última intervenção de conservação realizada aos paramentos areníticos confinados entre os cunhais do forte, através da projeção de argamassa com pigmento de cor clara.



Figura 3.21 - Muro exterior do forte, virado ao mar com zonas esbranquiçadas

A Figura 3.22 evidencia a mesma situação que se observou nos cunhais do forte, principalmente em zonas escavadas para a abertura do fosso circundante e para a construção de uma escada de acesso a esse. Aí, a dimensão das manifestações alveolares é muito mais acentuada do que a que se observou nas pedras de cantaria dos cunhais.



Figura 3.22 - Zona de escarpa e contra-escarpa com Fenómenos de alveolização na parede e na escada de acesso ao fosso

3.6 Considerações finais

O forte do Pessegueiro constitui uma presença marcante na ocupação humana daquele território litoral pois, para além da sua função inicialmente defensiva, impunha-se paisagisticamente como testemunho de poder. Atualmente representa um edificado histórico de elevado valor cultural, simbólico, estético e arquitetónico e, de certa forma, ímpar em toda a costa alentejana (Quaresma 2009).

Como qualquer estrutura sujeita aos agentes exteriores a sua integridade deve ser mantida através de métodos de abordagem aprofundando os valores do edificado a intervencionar e procurando compreender as vivências deste espaço enquanto parte integrante de um determinado tempo

histórico. O êxito de qualquer intervenção depende deste processo prévio, de forma a que sejam diminuídos os riscos por desconhecimento ou desatenção dos valores materiais e imateriais.

No que diz respeito aos valores materiais, esta coordenação deve assegurar a sustentabilidade temporal, ou seja, o método de intervenção deve estar subjacente à reutilização de materiais semelhantes aos já existentes na construção original.

Nas intervenções que foram realizadas no forte, e recorrendo aos registos, publicações e documentos existentes, foram aplicados materiais diferentes dos existentes como opção técnica e estética, tanto no interior como no exterior.

No exterior do edificado a extensa área dos paramentos rebocados apresentam manifestações de degradação através da ação de sais ou dos seres vivos que provocaram alterações da cor inicial do reboco e aparecimento de manchas negras e esverdeadas. Ao nível dos detalhes mais minuciosos, como o cordão do 2º piso (Figura 3.23), foi utilizado calcário “moca-creme” que, para além da diferença de coloração, apresenta um comportamento distinto do arenito local em todos os aspetos físico-mecânicos e químicos. Como foi referido no Capítulo 2, a ação de consolidantes baseados em silicatos de etilo diferem bastante nestes dois tipos de materiais.



Figura 3.23 Pormenor do cordão do 2º piso em arenito e continuidade em pedra moca-creme

O interesse histórico e cultural do edifício faz com que quaisquer opções técnicas de recuperação e conservação tenham que ter em conta, por um lado, a necessidade em respeitar o tipo de material empregue na construção original, por outro, a ação erosiva dos agentes da Geodinâmica Externa, particularmente agressiva dada a extrema proximidade ao mar. Deste modo, na definição de opções técnicas e estéticas, estas não devem ser generalizadas ou estereotipadas mas adequadas às necessidades técnicas e funcionais inerentes da atualidade, no pleno respeito do seu tempo histórico.

Capítulo 4 - Procedimentos experimentais

4.1 Considerações iniciais

A campanha experimental realizada no âmbito da presente dissertação teve como finalidade, em primeiro lugar, compreender o comportamento de estruturas constituídas por arenitos, a sua formação, o seu estado atual e a degradação que este tipo de pedras sofre quando situado em zonas costeiras, tendo em consideração as características físico-mecânicas e químicas; em segundo lugar, pretendeu-se realizar uma consolidação do referido material através de processos que envolvem agentes de consolidação que permitem recuperar ou melhorar a capacidade sustentadora dos materiais. A análise de resultados realizados pré e pós-consolidação permitirá avaliar as vantagens e desvantagens do recurso a este tipo de técnica.

A campanha experimental foi realizada nos Laboratórios de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade Nova de Lisboa e nos Laboratório de ensaio de resistência ao fogo do Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Por se tratarem de amostras no estado natural, foi necessário recorrer a uma empresa de corte de mármore, por dispor de equipamento específico de corte com precisão, capaz de obter provetes prismáticos com as dimensões normalizadas (4x4x16 cm), condição requerida para a execução de todos os ensaios necessários na fase prática deste trabalho.

Por se tratar de uma edificação com valor cultural e histórico foi necessário solicitar autorização junto de entidades responsáveis pela sua gestão e conservação. Uma vez que o forte se encontra inserido em pleno Parque Natural do Litoral Alentejano e Costa Vicentina, PNLACV, o Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, I.P., ICNF, é a entidade sobre cuja jurisdição o forte se encontra. Contudo, qualquer trabalho que vise a sua manutenção necessita da autorização da Direção Regional de Cultura do Alentejo. Assim, só após alguns contactos com esta entidade e com o Departamento de Conservação da Natureza e Florestas do Algarve, foi possível obter autorização para efetuar estudos não-destrutivos e recolha de amostras no Forte de N^a Sra. da Queimada (ou da Ilha de Dentro ou da praia do Pessegueiro).

Todo o processo de caracterização física e mecânica foi devidamente planeado, respeitando todos os procedimentos de ensaio, tendo por base as respetivas normas para pedras naturais. As diferentes fases para obtenção dos provetes utilizados durante o processo experimental da presente dissertação são apresentadas na Figura 4.1, de acordo com a numeração apresentada.

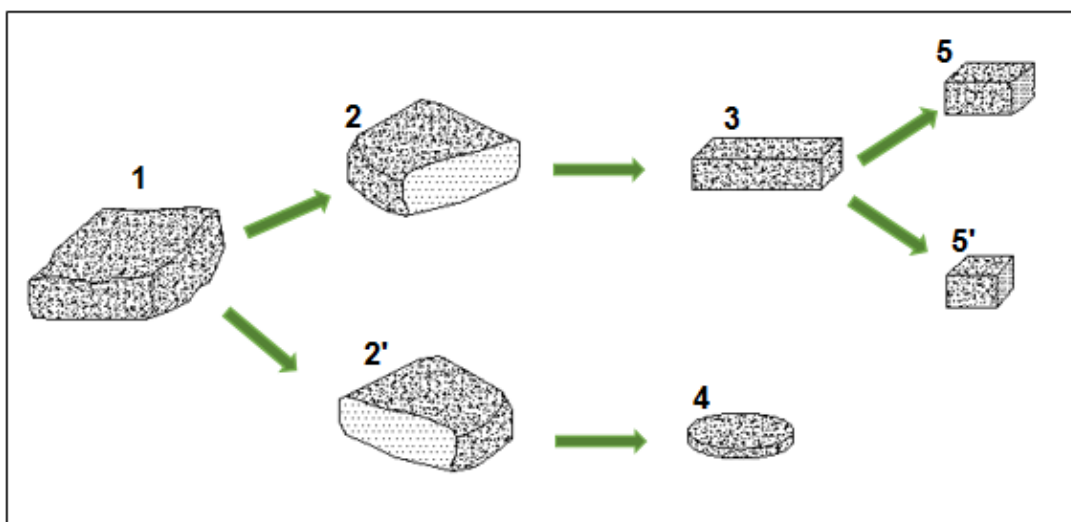


Figura 4.1 - Procedimento experimental adotado para obtenção dos provetes prismáticos e cilíndricos

4.2 Recolha e preparação das amostras

A visita e recolha de amostras do Forte da praia do Pessegueiro foi guiada e supervisionada pela Dra. Deolinda de Sousa Tavares, da Direção Regional de Cultura do Alentejo. As amostras retiradas faziam parte da constituição do muro exterior que envolve o forte, encontrando-se desagregadas deste, não tendo sido comprometido o atual estado do muro em questão. Foram recolhidas doze amostras no estado bruto, com dimensões variadas e em diferentes localizações do muro exterior. Estas amostras foram classificadas alfabeticamente de A a L, diferenciando a origem de cada uma delas.

Já no laboratório, antes de se proceder ao corte das amostras, foi tido em conta um parâmetro característico destas formações geológicas: a sua orientação estratigráfica, ou seja, a estratificação da rocha que consiste na disposição em camadas, através de processos físicos e químicos associados ao transporte das partículas constituintes, sua deposição, compactação, cimentação, etc. (Amadei, 1996).

A anisotropia é uma característica de vários tipos de rochas, que inclui as rochas sedimentares laminadas e/ou estratificadas, como os arenitos e calcários, para além das rochas metamórficas com foliação (xistos, ardósias, gnaisses, etc.) e que consiste na diferença de comportamento que apresentam quando varia a direção estudada. A sua importância nas rochas não é tão elevada como acontece como outros materiais de construção, como a madeira, mas é um parâmetro que influencia os procedimentos de ensaio estáticos (resistências à rotura em compressão uniaxial e em tração por flexão) e dinâmicos (velocidade de ultrassons) (Amadei, *op.cit.*).

A aplicação das tensões nestes ensaios teve de ter em conta a orientação da estratificação das amostras. Como se pode observar pela Figura 4.2, a resistência à rotura em compressão uniaxial deste tipo de material é máxima quando a inclinação dos estratos é praticamente vertical relativamente à tensão aplicada (entre 70° e 90°) ou horizontal e vai diminuindo à medida que a inclinação dos estratos varia entre certos valores, atingindo o valor mínimo quando é de cerca de 30°.

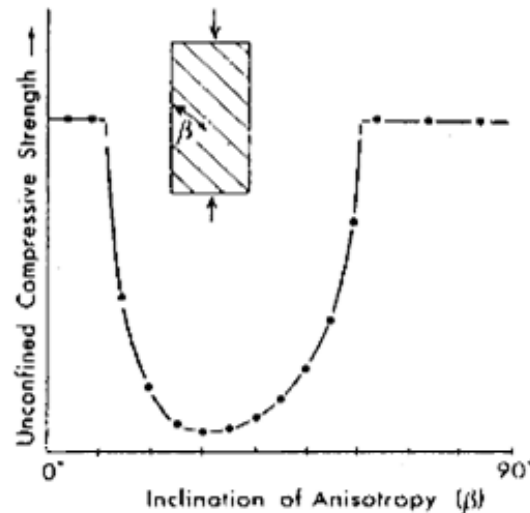


Figura 4.2 - Efeitos da anisotropia em ensaios de compressão uniaxial em rochas (Donath (1961) in Brunsden & Prior (1984))

Posteriormente, cada uma destas amostras foi sujeita ao corte, através da serra de corte elétrica do Departamento de Ciências da Terra da FCT/NOVA, tendo-se obtido duas metades (2 e 2' na Figura 4.1 e Figura 4.3) que deram origem a dois tipos de provetes: prismáticos (3) e discoides (4). Dependendo das dimensões e das características geométricas das pedras retiradas do campo, foi possível obter de cada uma, quantidades diferentes de provetes. No caso dos prismáticos, estes deveriam ter 16 cm de altura, no máximo, e caso não fosse possível, 10 cm, no mínimo. Foram realizados cortes por forma a obter o maior número de provetes por amostra e, posteriormente aos mesmos, foi tida em conta a orientação dos estratos em relação ao comprimento dos provetes. Realizados os cortes verificou-se que os comprimentos dos provetes coincidiram sempre com direções paralelas ou perpendiculares às dos estratos, não tendo existido casos em que as orientações variassem entre 0° e 70°, que correspondem a menores resistências mecânicas, como mencionado atrás.

Do total obtido de cada amostra, metade foi destinada a ser ensaiada no estado natural, sem qualquer tratamento e a outra metade foi sujeita a tratamento de consolidação através do produto Tegovakon V, da *T. Goldschmidt*.



Figura 4.3 - Amostras no estado natural, após o primeiro corte

Os prismas foram obtidos através do equipamento de corte utilizado por uma empresa que trabalha com mármore e cantarias, que foi adaptado a este tipo de pedra muito branda. Este equipamento utiliza uma grande quantidade de água para evitar o sobreaquecimento da lâmina, tendo aquela sido reduzida para a quantidade mínima possível para evitar a desagregação do material. A precisão de corte daquele tipo de equipamento não é destinada para ser exata, havendo ligeiras diferenças nas dimensões dos provetes. No caso dos provetes em que foi possível obter as dimensões pretendidas, ou seja, 4x4x16 cm as dimensões, na base, são $4\text{ cm} \pm 0,3\text{ cm}$ e, em altura, $16\text{ cm} \pm 1,5\text{ cm}$.

Por outro lado os provetes em forma de disco foram obtidos por meio de uma caroteadora que acionava uma broca com 10 cm de diâmetro exterior e cerca de 9,3 cm de diâmetro interior (dimensão final dos cilindros). A carotagem foi executada com injeção a água para evitar sobreaquecimento do equipamento, sendo de igual modo utilizada a quantidade mínima necessária para minimizar qualquer dano sobre as amostras em causa (Figura 4.4). As alturas/espessuras médias das amostras em forma final de disco variaram entre 1,5 e 1,8 cm.



Figura 4.4 - Processo para obtenção dos provetes cilíndricos através de equipamento com caroteadora

O número de provetes obtidos após o processo de corte das amostras e a relação entre a estratificação e o maior comprimento dos provetes, tanto prismáticos como cilíndricos, estão descritos na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Corte das amostras em relação à direção dos estratos e quantidades totais de provetes obtidos

Amostra	Comprimento vs direção dos estratos		Nº provetes prismáticos			Nº provetes discoides	
	Paralelo	Perpendicular	Em condições normalizadas (4x4x16)	Em condições não normalizadas	Total	Nº de cilindros caroteados	Total
A	•		0	2	2	-	-
B	•		2	1	3	1	3
C		•	0	2	2	1	3
D		•	1	1	2	1	3
E		•	4	1	5	1	4
F		•	6	3	9	2	11
G		•	1	1	2	-	-
H	•		0	2	2	-	-
I		•	2	1	3	1	4
J	•		4	0	4	1	3
K	•		6	6	12	1	5
L	•		19	3	22	5	37
Total			45	23	68	14	73

4.3 Sistema de classificação dos provetes

Após concluído o processo de transformação da pedra no estado natural em provetes cilíndricos e prismáticos, foram obtidos sessenta e oito paralelepípedos, dos quais quarenta e cinco tinham as dimensões padrão (4x4x16) cm e vinte e três não alcançaram estas dimensões. Em relação aos cilindros, foram obtidos setenta e três exemplares, todos com o mesmo diâmetro, embora com espessuras variáveis devido à falta de precisão do equipamento de corte em produzir amostras com espessuras tão pequenas. Todas as amostras foram marcadas nos topos, a verde, com a letra que designa a sua origem (de A a L).

De entre os exemplares obtidos e tendo em conta a planificação dos trabalhos experimentais, foram selecionados trinta e dois provetes prismáticos e doze provetes cilíndricos, destinando-se metade de cada um destes a ser ensaiado no estado normal e a outra metade a ser sujeita ao processo de consolidação. Ou seja, para cada grupo (natural e consolidado), dezasseis provetes prismáticos foram ensaiados para obtenção do módulo de elasticidade dinâmico e, em seguida, resistência à tração por flexão. Este último ensaio dividiu cada provete em duas metades (5 e 5' na Figura 4.1), tendo-se obtido de uma delas massas volúmicas e porosidade aberta bem como a resistência à rotura em compressão uniaxial e da outra metade, valores do coeficiente de

capilaridade e do índice de secagem. Os provetes cilíndricos foram exclusivamente utilizados para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água.

Para este efeito, os provetes foram novamente marcados, agora a vermelho e na face aposta onde tinha sido marcada a origem, com a designação PN (proвете no estado natural) ou PC (proвете no estado consolidado), fazendo a distinção entre os que seriam ensaiados sem qualquer tratamento e aqueles que seriam sujeitos a um processo de consolidação antes dos ensaios (Figura 4.5).

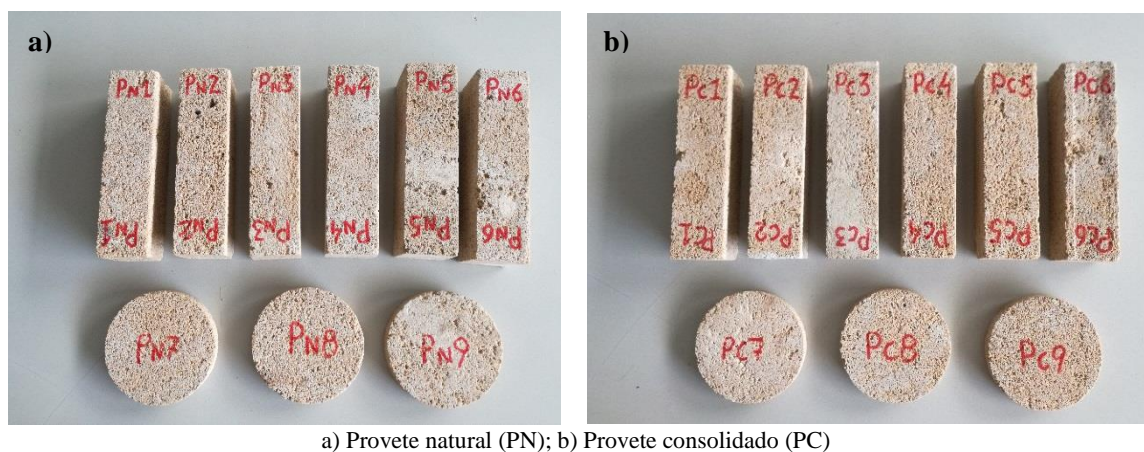


Figura 4.5 - Provetes prismáticos e cilíndricos assinalados com a respetiva designação.

Da quantidade total de provetes obtidos foram selecionados aqueles que reuniam características geométricas mais próximas das normalizadas. Em relação aos provetes prismáticos e tendo em conta as dimensões (4x4x16) cm, foram escolhidos aqueles que se aproximavam mais destas. Em relação aos provetes cilíndricos, foram selecionados aqueles em que a espessuras eram mais constantes, sem grandes desvios.

Tendo em conta este critério, apresentam-se na Tabela 4.2 a lista de provetes utilizados durante a presente dissertação e o tipo de tratamento a que os provetes consolidados foram sujeitos. Inicialmente a campanha experimental foi estruturada apenas para a aplicação de consolidante por absorção por capilaridade, mais tarde por forma a ter um termo de comparação implementou-se outro tipo de tratamento – por pincelagem; no entanto, a quantidade de produto disponível não era suficiente para ensaiar a mesma quantidade de provetes que o primeiro método, tendo-se consolidado por pincel apenas três provetes.

Tabela 4.2 - Designação dos provetes obtidos e tipo de processo consolidante aplicado

Amostra	Provete	Processo de consolidação			Tipo	
		Natural	Imersão parcial	Pincelagem	Prisma	Disco
B	B_PN1	•			•	
	B_PN2	•				•
	B_PC1		•		•	
	B_PC2		•			•
C	C_PN1	•			•	
	C_PN2	•				•
	C_PC1		•		•	
	C_PC2		•			•
E	E_PN1	•			•	
	E_PC1		•		•	
F	F_PN1	•			•	
	F_PN2	•			•	
	F_PN3	•				•
	F_PC1		•		•	
	F_PC2		•		•	
	F_PC3		•			•
I	I_PN1	•			•	
	I_PC1		•		•	
J	J_PN1	•			•	
	J_PC1		•		•	
K	K_PN1	•			•	
	K_PN2	•			•	
	K_PN3	•			•	
	K_PC1		•		•	
	K_PC2		•		•	
	K_PC3		•		•	
L	L_PN1	•			•	
	L_PN2	•			•	
	L_PN3	•			•	
	L_PN4	•			•	
	L_PN5	•			•	
	L_PN6	•			•	
	L_PN7	•				•
	L_PN8	•				•
	L_PN9	•				•
	L_PC1		•		•	
	L_PC2		•		•	
	L_PC3		•		•	
	L_PC4		•		•	
	L_PC5		•		•	
	L_PC6		•		•	
	L_PC7		•			•
	L_PC8		•			•
	L_PC9		•			•
	L_PCB1			•	•	
	L_PCB2			•	•	
	L_PCB3			•	•	

4.4 Aplicação do consolidante

A aplicação de consolidante é um tema que tem sido bastante discutido e não existe um consenso quanto ao melhor método a utilizar, não havendo qualquer diretriz normativa que indique o procedimento correto de aplicação do produto. Como já foi referido, os tipos de aplicação mais utilizados são por pincelagem ou pulverização das superfícies, absorção por capilaridade (imersão parcial), absorção através do revestimento recorrendo a compressas ou absorção por imersão total, variando o tempo de contacto com o produto, que pode ir de 15 minutos a 48 horas.

Tendo em conta que a presente dissertação pretende servir de plataforma para um possível trabalho de consolidação *in-situ*, e tratando-se de uma estrutura de grandes dimensões, com exceção da imersão total todos os restantes métodos de aplicação podem ser utilizados nos elementos construtivos do edificado. No entanto, os métodos de pulverização e pincelagem não representam garantias de conseguirem ser eficazes na impregnação do produto no seio da estrutura por não permitirem um contacto contínuo daquele com a superfície a tratar.

A replicação de um tratamento de consolidação de um processo semelhante aos da capilaridade pode ser implementado em monumentos com recurso a reservatório com produto que faça o escoamento deste para uma compressa de algodão hidrófilo em contacto com as superfícies, envolto por um filme de polietileno, forçando o prolongamento do contacto e evitando a sua evaporação durante o processo de impregnação. (Marques, 2008)

No trabalho de investigação ensaiou-se um produto à base de silicato de etilo, com a designação comercial de Tegovakon V, produzido pela firma *Goldschmidt*, que consiste num ortosilicato de tetraetilo à base de silício. Será referido como TG (Figura 4.6).



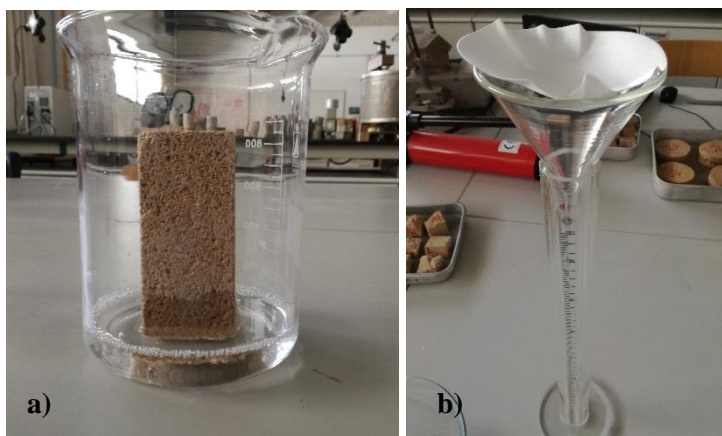
Figura 4.6 – Produto consolidante Tegovakon

Os fatores que justificaram a escolha deste produto foram a sua disponibilidade no mercado e fácil aquisição em relação a outros produtos à base de silicatos de etilo, tendo sido obtidas quantidades não-industriais.

A grande parte das amostras foi ensaiada através do método de absorção por capilaridade e por forma a ter um termo de comparação foram selecionados três provetes e estes foram ensaiados através do método de pincelagem. Os provetes consolidados através do primeiro método foram sujeitos a todos os ensaios laboratoriais enquanto os que foram consolidados através de pincelagem apenas se efetuaram ensaios mecânicos (módulo de elasticidade e resistências mecânicas).

4.4.1 Consolidação por absorção por capilaridade

Para este procedimento foi necessário recorrer a copos de precipitação, ou gobelés, com 2000 ml de volume, onde foram inseridos os provetes, uma proveta de 400 ml, onde foi colocado o produto consolidante e um funil cónico e respetivo filtro, para fazer a separação de agregados do líquido que não foi absorvido pelas amostras (Figura 4.7).



a) Método de aplicação por capilaridade; b) Funil com filtro para aproveitamento do produto em excesso

Figura 4.7 - Processo de aplicação do consolidante

Os provetes foram colocados dentro de copos de precipitação com capacidade para levar quatro provetes prismáticos ou cinco discoides de cada vez (Figura 4.8a, b). Em cada um deles foram introduzidos previamente 400 ml de consolidante Tegovakon V e de seguida, colocaram-se os provetes prismáticos no seu interior, chegando o líquido a uma altura de 4,5 cm a partir da base, e durante uma hora, por ação da capilaridade, o consolidante começou a ascender nos provetes (Figura 4.8c).

Ao fim de uma hora os provetes prismáticos foram virados, subindo por ação da capilaridade o líquido em contacto agora com a zona seca e descendo, por ação da gravidade, o líquido que se encontrava no interior dos poros (Figura 4.8d; e). O mesmo procedimento foi realizado para os provetes discoides. Relativamente aos provetes prismáticos, ao estar em contacto com o consolidante a partir dos dois lados, obtiveram-se um total de 9 cm imersos em líquido, o que representa mais de 50 % da altura dos provetes. Apenas os cerca de 7 cm restantes, na zona central dos provetes, são saturados por capilaridade e por gravidade. Desta forma garantiu-se a saturação

total dos provetes. Este processo prolongou-se por mais de uma hora. Por fim, os provetes foram retirados e colocados num tabuleiro, voltando cada um deles novamente 180° para que a zona em contacto com o líquido nesta última fase ficasse novamente no topo, voltando a descer por ação da gravidade e garantindo assim a total saturação dos poros. Os provetes foram colocados a secar durante 48h numa sala em ambiente controlado com condições de humidade relativa a rondar os 65 % e uma temperatura de 24°C .

No caso dos provetes em disco, a diferença entre as duas zonas que são mergulhadas no líquido consolidante é bem menor devido ao facto do diâmetro daqueles ser um pouco inferior a 10 cm. Neste caso, o tempo de contacto em cada uma das posições foi de meia hora, o processo de consolidação dos provetes cilíndricos foi de uma hora e o tempo de secagem foi igualmente de 48 horas.



a) Provetes prismáticos no interior de gobelés; b) Consolidação de provetes cilíndricos; c) Ascensão por capilaridade do produto consolidante; d) Preenchimento parcial dos poros após os provetes serem invertidos; e) Saturação aparente dos provetes

Figura 4.8 - Processo de consolidação dos provetes

Ao fim de 48 horas de secagem os provetes apresentavam um aspeto vitrificado, com acumulação de material na base, que resultou do processo de polimerização do produto consolidante no interior dos provetes, obtendo-se como produto de reação um gel de sílica amorfo, incolor e fissurado (Figura 4.9).



Figura 4.9 - Formação de gel de sílica amorfa resultante da aplicação do consolidante após o processo de cura, com visível microfissuração

4.4.2 Consolidação através de pincelagem

Este procedimento foi realizado em duas demãos e foram utilizados, para auxílio do ensaio, um tabuleiro e um gobelé com 1000 ml de capacidade. Os provetes foram colocados na horizontal, dentro de um tabuleiro de laboratório e todas as faces foram consolidadas com recurso a uma trincha com 30 mm de largura. Foi utilizada uma quantidade significativa em cada pincelagem para que se atingisse o máximo de saturação possível. Ao fim de meia hora a secar, foi aplicado uma segunda demão. O tempo de secagem após o processo de consolidação foi de 48 horas.

4.4.3 Observação visual e variação de massa

O efeito da consolidação é a consequência de um processo de tratamento através de um produto consolidante que promove alterações físicas e mecânicas a um material em estudo. Um dos objetivos desta dissertação é observar e analisar os efeitos dos tratamentos em amostras de pedra natural e discutir os seus benefícios em relação ao estado original. O método mais direto de análise deste efeito recorre à observação visual, ou seja, à alteração da cor e aspeto final dos provetes. Após o processo, os provetes apresentam um aspeto humidificado, com algum brilho que resulta da formação à superfície de um gel de sílica, o que os torna ligeiramente mais escuros que no estado natural, mas sem aparecimento de manchas ou cores não-translúcidas.

A Figura 4.10 apresenta a diferença de cor em amostras sem tratamento (à esquerda) e 48 horas após terem sido tratadas com consolidante através de aplicação com pincel (à direita).

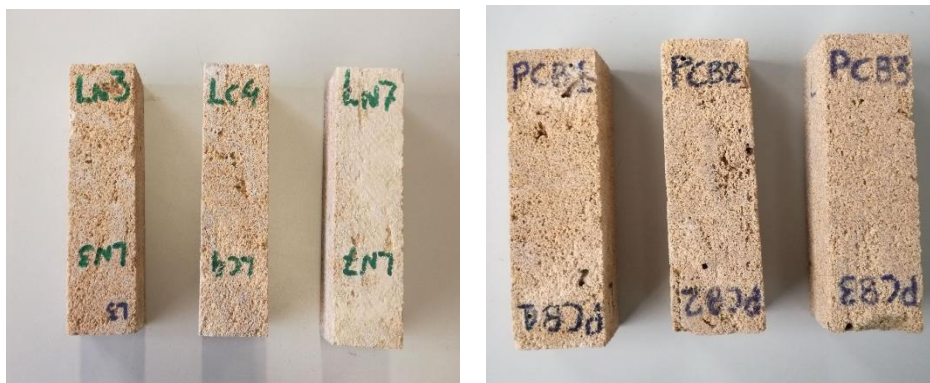


Figura 4.10 - Alteração ligeira de cor dos provetes prismáticos sem tratamento e após consolidação

Na Figura 4.11 apresentam-se as mesmas amostras, 48 horas depois de terem sido consolidadas por capilaridade (à esquerda) e passados 90 dias do mesmo tratamento (à direita). É possível observar que nas duas situações existe uma alteração na cor, apresentando um aspeto ligeiramente mais escurecido após uma cura de 48 horas, notando-se que o processo de consolidação por capilaridade acrescenta uma maior intensidade no escurecimento em relação ao método por pincelagem. Conclui-se também que esse escurecimento tem tendência a desaparecer com o tempo, aproximando-se bastante da tonalidade natural.



Figura 4.11 - Comparação entre os mesmos provetes 48 horas após terem sido consolidados e 90 dias depois

A pesagem das amostras representa um método físico básico cujo resultado depende da porosidade da pedra e da quantidade de poros abertos de tal forma que permitam que o líquido consolidante nela penetre e preencha esses vazios. Este processo implica um aumento de massa no provete que pode ser analisado, medindo a variação de massa antes e depois do tratamento. As diferenças de massa estão relacionadas com o nível de saturação que o método proporcionou.

A análise da Figura 4.12 permite constatar que todas as amostras sofreram um aumento de massa em relação ao estado original, o que possibilita afirmar que o processo de consolidação foi eficaz na entrada de consolidante para o meio poroso dos provetes. Os provetes provenientes das amostras em análise sofreram um aumento de massa, entre cerca de 8 % a 13 %.

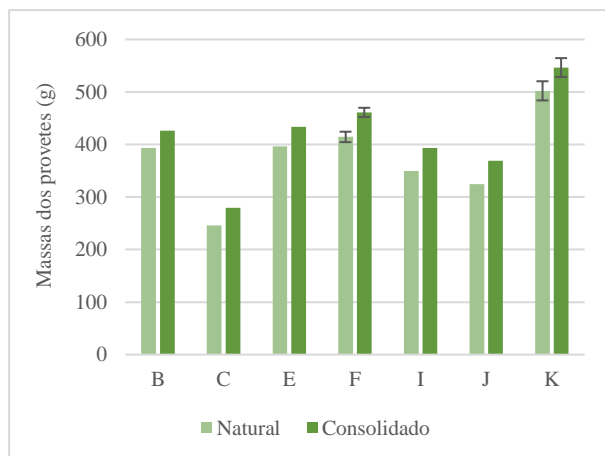


Figura 4.12 - Resultados obtidos de massas dos provetes no estado natural (PN) e após consolidação (PC)

Para avaliar a diferença entre os dois processos de tratamento, por imersão parcial e por pincelagem, recorreram-se a provetes com a mesma origem, ou seja, provetes provenientes da mesma amostra. Através da análise de provetes de origem L, sujeitos a tratamento através dos dois processos, avaliou-se o efeito da consolidação pela variação de massa (Figura 4.13). Verificase que houve uma maior variação de massa dos provetes no tratamento por imersão em relação ao tratamento por pincelagem.

Neste capítulo serão ainda apresentados os resultados de ensaios físicos e mecânicos que, de uma forma indireta, caracterizam a eficácia de consolidação através de alterações das suas propriedades.

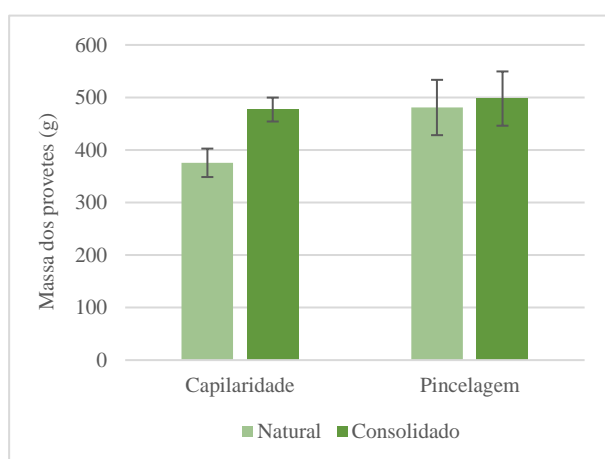


Figura 4.13 Resultados obtidos de massas dos provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC) através de processos de aplicação diferentes

4.5 Procedimentos dos ensaios de caracterização realizados

4.5.1 Ensaios de caracterização *in-situ*

Na visita ao Forte da Praia do Pessegueiro, em maio de 2017, foram realizados ensaios apenas nas zonas onde estava visível o arenito com que o forte foi construído, não tendo sido efetuados ensaios nas zonas rebocadas. O muro exterior não possui em toda a sua área, qualquer camada de reboco, enquanto as paredes exteriores do forte apresentam apenas zonas sem reboco nos cunhais das fachadas e baluartes.

Os ensaios realizados *in-situ* foram o ensaio de permeabilidade a baixa pressão, com recurso ao tubo de Karsten e o ensaio de dureza por resalto com martelo de Schmidt ou esclerómetro. Foram escolhidos seis pontos ao longo do perímetro do forte e efetuados os ensaios a cerca de 1 m acima do terreno. Os pontos de ensaio 1 e 2 localizaram-se no muro exterior do forte, os pontos de ensaio 3 e 4 nos baluartes e os pontos 5 e 6 localizam-se em dois cunhais da frente do forte virado ao mar (Figura 4.14).

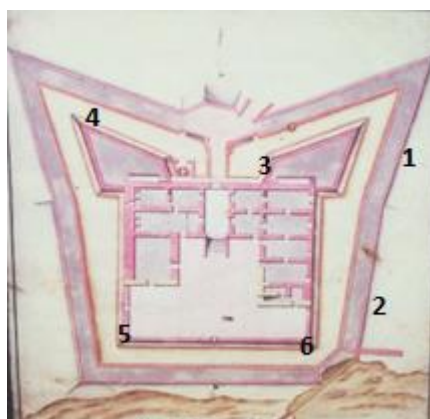


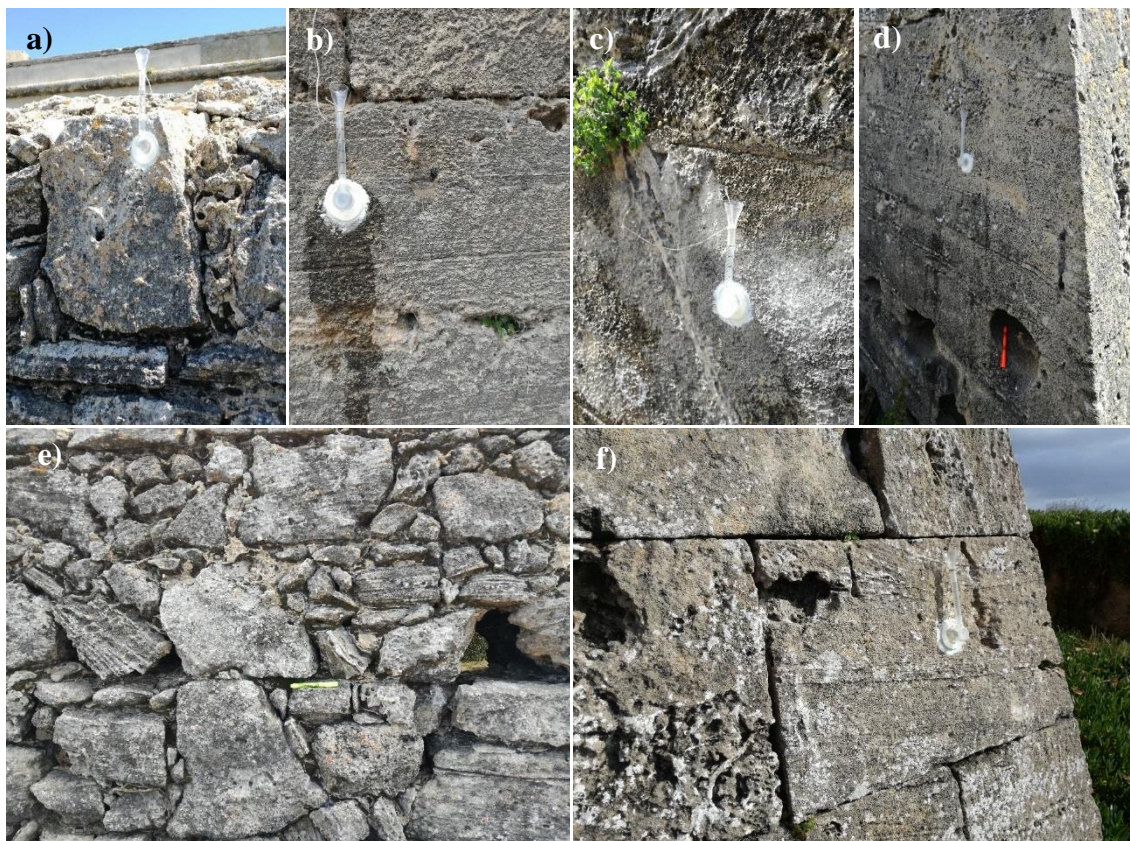
Figura 4.14 - Localização em planta das zonas de realização de ensaios *in-situ*

4.5.1.1 Ensaio de permeabilidade a baixa pressão com tubo de Karsten

Este método foi utilizado para avaliar a resistência à penetração das cantarias em arenito do forte por água destilada, baseada na relação entre o volume de água absorvido sob baixa pressão e o período de tempo necessário para o efeito. O ensaio foi realizado com base na EN 16302 (CEN, 2013).

Para a realização do ensaio foram utilizados tubos de vidro graduado de 0 a 4 cm³, em forma de cachimbo, com uma zona inferior cilíndrica de fundo fechado. Fixou-se a secção aberta com bordo plano a uma face lisa das pedras selecionadas para ensaio, tendo para tal sido utilizada plasticina que, para além da dupla função de material aderente e isolante, é também não solúvel em contacto com água. Foi necessário medir o diâmetro interno do tubo, que corresponde à secção

real que é atravessada pela água (Figura 4.15). O ensaio consistiu em preencher de água, com o auxílio de um esguicho, até à marca horizontal dos 0 cm³, sem que houvesse plasticina a reduzir a área real da secção em contacto com a água, fixando-o á parede na zona ensaiada, pressionando-o sobre a superfície e fazer a contagem do tempo.



a) zona 1; b) zona 3 com escorrência de água; c) zona 4; d) zona 5; e) zona 2; f) zona 6

Figura 4.15 - Ensaio de permeabilidade a baixa pressão com tubo de Karsten em diferentes zonas do forte

Tendo em conta que se trata de um material bastante poroso, os tempos foram muito reduzidos (na maior parte dos casos nem chegou a um minuto) devido à facilidade que o líquido teve em penetrar no interior das paredes. A Tabela 4.3 ilustra a absorção de água ao fim de uma hora realizada com a média de três medições em cada zona.

Tabela 4.3 - Absorção de água nas zonas consideradas ao fim de 1 hora de ensaio

Localização	Zona	Tempo		Absorção de água a baixa pressão (cm ³) (a 1 h)
		t [seg]	t [min]	
Muro exterior	1	27,0	0,4	4,0
	2	55,7	0,9	4,0
Parede do Forte	3	161,3	2,7	4,0
	4	1348,4	22,5	1,0
	5	25,1	0,4	4,0
	6	17,1	0,3	4,0

A quantidade de água absorvida por unidade de área [ml/cm²], é obtida através da equação 4.1.

$$W_f = \frac{Q_f}{A} \quad [\text{ml/cm}^2] \quad (4.1)$$

Onde, W_f – volume de água absorvida por unidade de área, em ml/cm², Q_f – água absorvida, em ml, e A – área de contacto com o bloco, em cm².

4.5.1.2 Ensaio de dureza por ressalto com martelo de Schmidt

O ensaio de dureza por ressalto com martelo de Schmidt ou esclerómetro consiste num método não-destrutivo que fornece uma estimativa das propriedades mecânicas das rochas, principalmente em relação à resistência quando sujeito à compressão uniaxial.

O martelo utilizado para a realização deste ensaio é do tipo L por ter um impacto inferior ao do tipo N, e foram efetuadas vinte medições em cada um dos seis pontos mencionados anteriormente onde o esclerómetro foi colocado perpendicularmente ao paramento a ensaiar. O método consiste em pressionar o aparelho contra a superfície e o pistão no seu interior é libertado sobre esta. Parte dessa energia de impacto é consumida por absorção do material rochoso e transformação em forma de calor e som, enquanto a restante energia representa a resistência ao impacto de penetração da superfície. Quanto mais resistente for a superfície rochosa, maior será o valor do ressalto, R , que corresponde à distancia percorrida pelo pistão desde o momento do impacto (Aydin, 2009). Vários estudos desenvolveram equações que relacionam a resistência à compressão uniaxial com o valor de ressalto e num caso com o parâmetro da massa volúmica (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 - Correlações de vários autores entre o valor de ressalto (R) e a resistência à rotura em compressão uniaxial (RCU)

Referência	Equação
Deere & Miller (1966)	$RCU = 6,9 \times 10^{(0,0087 R + 0,16)}$
Singh et al. (1983)	$RCU = 2R$
O' Rourke (1989)	$RCU = 702R - 1104$
Katz et al. (2000)	$RCU = 2,208e^{0,067R}$
Saptono et al. (2013)	$RCU = 0,308R^{1,327}$

O valor médio de valor de ressalto, R , para as diferentes zonas consideradas foi de 17,2 e o valor de massa volúmica correspondente aos provetes não-consolidados foi de 1754,69 kg/m³. Das equações analisadas e comparando com os resultados de RCU dos provetes da amostra L, os valores obtidos por Katz et al. (2000) foram os que mais se aproximaram dos valores obtidos no presente estudo, como pode ser observado pela Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Valores de RCU obtidos a partir das equações utilizando os valores obtidos no presente estudo

Referência	RCU (MPa)
Deere and Miller (1966)	18,26
Singh <i>et al.</i> (1983)	34,41
O'Rourke (1989)	10,97
Katz <i>et al.</i> (2000)	6,99
Saptono <i>et al.</i> (2012)	13,09
Presente estudo (*)	6,12 ± 1,62

(*) Média obtida dos resultados dos ensaios laboratoriais sobre os provetes da amostra L

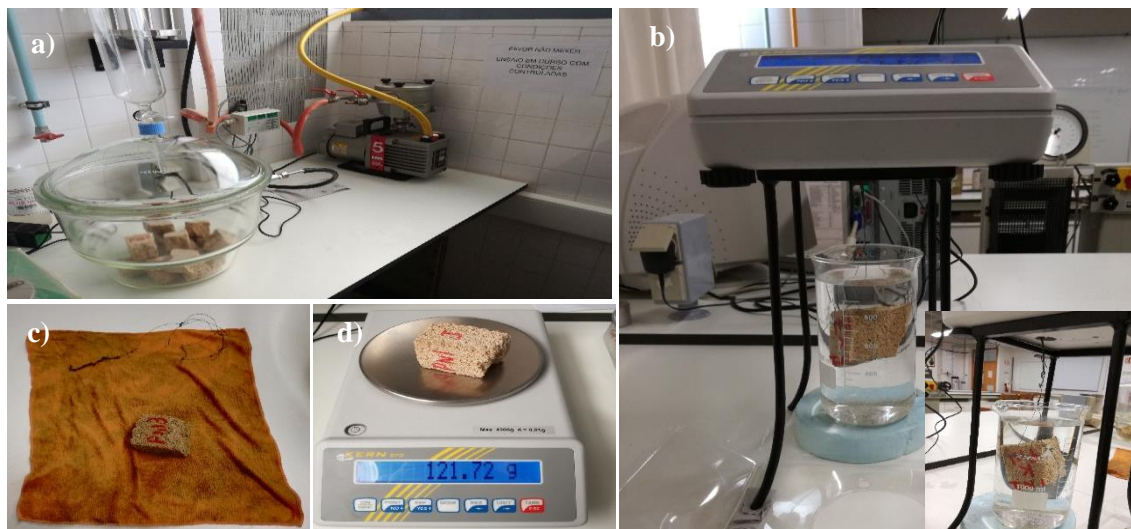
O presente método torna-se bastante útil para se obter uma aproximação da resistência em compressão uniaxial por ser muito simples e não-destrutivo; no entanto está associado a uma baixa precisão, constatando-se com as várias equações formuladas por diversos autores, com resultados muito distintos.

4.5.2 Ensaios de caracterização realizados em laboratório

4.5.2.1 Massa volúmica aparente, porosidade aberta e teor máximo em água

Na realização do ensaio para a massa volúmica aparente, da porosidade aberta e teor máximo em água, foi tida em conta a norma EN 1936 (CEN, 2008); a generalidade das amostras utilizadas apresentava, pelo menos, 60 ml de volume, que corresponde à dimensão requerida pela norma. As amostras em causa são as mesmas utilizadas no ensaio de resistência à rotura em compressão depois de retirado o material desagregado. Para realizar o ensaio recorreu-se à mesma balança de precisão de 0,01 g, um exsiccador de duas entradas, uma com ligação a bomba de vácuo e a outra por onde se dá entrada da água para saturação proveniente de um funil de carga. Inicialmente, as amostras foram colocadas numa estufa ventilada a 70 °C até atingirem massa constante, ou seja, até que a diferença entre duas pesagens consecutivas, num intervalo de 24 h, não fosse superior a 0,1 % da massa da amostra. Quando a temperatura das amostras atingiu a temperatura ambiente foi realizada uma primeira pesagem que correspondia à massa seca (m_d); seguidamente as amostras foram colocadas no interior do exsiccador, que depois de fechado com a tampa, foi ligado à bomba de vácuo. Este procedimento foi mantido até que a pressão no interior do exsiccador atingisse (15 ± 5) mm Hg. Estas condições de vácuo foram mantidas durante 24 h por forma a eliminar todo ar contido no interior dos poros, e no final foi introduzida, muito lentamente, água através da mangueira de modo que as amostras ficassem completamente submersas em pelo menos 15 minutos. As amostras permaneceram nestas condições durante 24 h ao fim das quais a bomba foi desligada, alterando as condições de vácuo para as de pressão atmosférica permanecendo as amostras imersas mais 24 h. Ao fim das 72 h desde o início do ensaio, os provetes saturados foram retirados do interior do exsiccador e procedeu-se à sua pesagem hidrostática, que consistiu em colocá-los num pequeno cesto de arame, mergulhá-las dentro de água destilada no interior de um gobelé sobre o qual se instalou uma balança com dinamómetro que registou a massa imersa (m_h).

Depois de retirados do interior do gobelé, foi retirado o excesso de água à superfície dos provetes e registada a sua massa saturada (m_s) (Figura 4.16).



a) Provetes no interior do exsicador; b) Procedimento para determinação da massa imersa (m_s); c) Pano saturado para absorção do excesso de água; d) Pesagem de provete

Figura 4.16 - Ensaio para determinação da massa volúmica, porosidade aberta e teor máximo de absorção de água.

Através destes três valores de massa, para cada provete foi possível obter os valores da massa volúmica aparente (equação 4.2), onde foi necessário ter em conta a massa volúmica da água (ρ_a), à temperatura ambiente ($20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$) com o valor de $\rho_{20\text{ }^{\circ}\text{C}} = 998,21\text{ kg/m}^3$, da porosidade aberta (equação 4.3) e do teor máximo em água (equação 4.4).

$$\rho = \frac{m_d}{m_s - m_h} \times \rho_a \quad [\text{kg/m}^3] \quad (4.2)$$

$$n = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \times 100 \quad [\%] \quad (4.3)$$

$$w = \frac{m_s - m_d}{m_d} \times 100 \quad [\%] \quad (4.4)$$

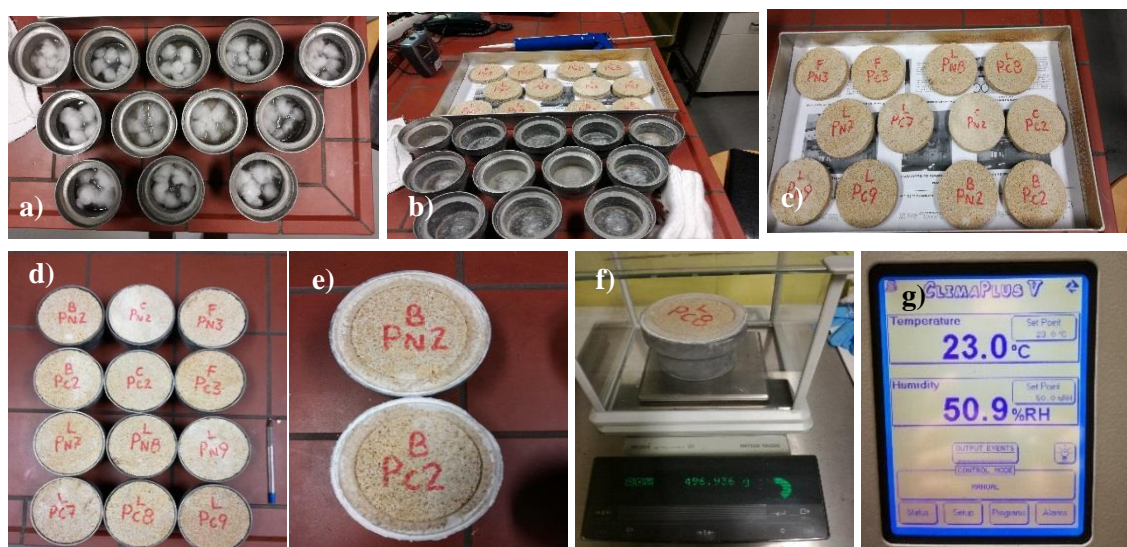
Os resultados médios obtidos de massas volúmicas, porosidade aberta e teor máximo em água encontram-se na Tabela 4.4.

Tabela 4.6 - Valores de massas volúmicas aparentes, porosidade aberta e teor máximo em água absorvida dos provetes não tratados e consolidados

Tipo	Massa volúmica aparente (ρ) (kg/m^3)	Porosidade aberta (n) [%]	Teor máximo em água (w) [%]
Natural	$1754,7 \pm 84,6$	$38,2 \pm 3,1$	$23,0 \pm 3,2$
Consolidado	$1909,1 \pm 140,1$	$30,3 \pm 5,3$	$17,8 \pm 3,4$

4.5.2.2 Permeabilidade ao vapor de água

Tendo por base a NP EN ISO 12572 (CEN, 2016), foram ensaiados os provetes em disco, no estado natural e consolidado, utilizando um procedimento denominado de “método da cápsula húmida”. Este método inicia-se com a secagem dos provetes em estufa ventilada a $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ até se atingir massa constante; de seguida os provetes foram colocados em cápsulas onde previamente tinham sido colocados cerca de 45 g de água destilada, o que corresponde a cerca de 1,5 cm de altura na cápsula, juntamente com algodão para que não houvesse salpicos durante as operações. As cápsulas foram seladas entre o cilindro e a bordo metálico recorrendo a silicone transparente e colocadas no interior da câmara climática com temperatura de $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa (HR) de 50 % (Figura 4.17). Previamente foram pesados os conjuntos ‘cápsula húmida + provete’. O ensaio foi realizado durante 35 dias e foram feitas 24 medições, até que se atingisse um regime estacionário, ou seja, quando a diferença entre duas medições consecutivas seja inferior a 5 %.



a) Interior das cápsulas com algodão e água destilada; b) Preparação dos conjuntos; c) Provetes cilíndricos no estado natural e consolidada; d) Conjunto ‘cápsula+proвете’; e) Conjunto selado com silicone; f) Pesagem do conjunto em balança; g) Temperatura e HR da câmara climática

Figura 4.17 - Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

A permeabilidade ao vapor de água é uma das principais propriedades físicas da pedra de construção e está relacionada com a capacidade desta em permitir a passagem de líquido ou vapor através dos seus poros e interstícios. Em condições normais de pressão e temperatura, existe um equilíbrio entre a humidade presente no interior da pedra e a humidade atmosférica, mas quando este equilíbrio é desfeito e a pressão de uma das partes baixa, a outra absorve o vapor de água desta. O ensaio, realizado num interior de uma câmara climática, simula este fenómeno, onde uma cápsula com água no interior, com uma pressão superior à do meio envolvente, faz com que o vapor de água seja transmitido através do provete discoide para o exterior da cápsula. Quanto maior a porosidade do provete, maior será a difusão de vapor de água através deste. O ensaio de permeabilidade ao vapor de água utiliza cápsulas de material impermeável, uma balança com

precisão de 0,001 g, algodão hidrófilo, silicone e a já referida câmara climática. O ensaio foi realizado nas instalações do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

Através do conjunto de pesagem dos provetes, foi determinada a permeabilidade ao vapor de água, π através da equação 4.5.

$$\pi = \frac{G \times e}{A \times \Delta P \times 36 \times 10^5} \quad [\text{kg/m.s.Pa}] \quad (4.5)$$

Onde G representa o fluxo de vapor que atravessa a amostra, calculado a partir da média das diferenças de massa por unidade de tempo (g/h), com pelo menos cinco valores obtidos em regime estacionário; e a espessura do provete em m; A a área útil de ensaio da cápsula em m^2 e ΔP representa o diferencial de pressão entre os dois lados do provete em Pa. O registo das massas dos conjuntos ‘cápsula húmida + provete’ apresentam-se nas Tabelas 4.7 para os provetes não tratados e Tabela 4.8 para os provetes consolidados. As Figuras 4.18 e 4.19 apresentam esses resultados sobre a forma de gráfico para os provetes não tratados e consolidados, respetivamente.

Tabela 4.7 - Registo de massas durante o ensaio de permeabilidade ao vapor de água dos conjuntos ‘cápsula húmida+provetes’ dos provetes não tratados, ao longo do tempo de ensaio.

Data	Dias	Horas	Horas ^{1/2}	Massas do conjunto (Provetes + cápsula húmida) (¹) (g)					
				B_PN2	C_PN2	F_PN3	L_PN7	L_PN8	L_PN9
08-11-2017 - 12:00 h	0	0	0,00	474,195	500,002	446,261	486,517	487,153	498,876
09-11-2017 - 12:00 h	1	24	4,90	473,075	499,217	445,195	485,383	486,114	498,175
10-11-2017 - 12:00 h	2	48	6,93	472,279	498,725	444,495	484,668	485,354	497,642
13-11-2017 - 12:00 h	5	120	10,95	469,863	497,224	442,382	482,492	483,048	495,973
14-11-2017 - 12:10 h	6	144	12,00	469,033	496,706	441,662	481,749	482,265	495,415
15-11-2017 - 12:00 h	7	168	12,96	468,226	496,202	440,954	481,024	481,504	494,864
16-11-2017 - 12:00 h	8	192	13,86	467,422	495,699	440,246	480,295	480,743	494,316
17-11-2017 - 12:15 h	9	216	14,70	466,611	495,192	439,533	479,560	479,978	493,767
20-11-2017 - 12:00 h	12	288	16,97	464,309	493,747	437,501	477,476	477,811	492,205
21-11-2017 - 12:00 h	13	312	17,66	463,492	493,229	436,782	476,732	477,042	491,652
22-11-2017 - 12:00 h	14	336	18,33	462,709	492,732	436,084	476,014	476,301	491,120
23-11-2017 - 12:00 h	15	360	18,97	461,886	492,215	435,359	475,268	475,526	490,566
24-11-2017 - 12:00 h	16	384	19,60	461,093	491,712	434,657	474,546	474,774	490,029
27-11-2017 - 12:00 h	19	456	21,35	457,767	490,141	432,484	472,345	472,531	488,464
28-11-2017 - 12:30 h	20	480	21,91	456,972	489,636	431,771	471,627	471,788	487,947
29-11-2017 - 12:00 h	21	504	22,45	456,134	489,121	431,060	470,907	471,045	487,421
30-11-2017 - 11:30 h	22	528	22,98	455,179	488,593	430,331	470,169	470,285	486,890
04-12-2017 - 11:30 h	25	600	24,49	451,313	486,542	427,470	467,281	467,295	484,815
05-12-2017 - 12:00 h	26	624	24,98	450,400	486,032	426,757	466,561	466,559	484,295
06-12-2017 - 12:00 h	27	648	25,46	449,555	485,525	426,053	465,848	465,826	483,785
07-12-2017 - 12:10 h	28	672	25,92	448,716	485,033	425,364	465,148	465,106	483,285
11-12-2017 - 12:00 h	31	744	27,28	445,709	483,114	422,689	462,433	462,300	481,307
12-12-2017 - 12:00 h	32	768	27,71	444,834	482,562	421,928	461,662	461,513	480,746
13-12-2017 - 12:00 h	33	792	28,14	444,108	482,098	421,283	461,004	460,830	480,272
14-12-2017 - 12:00 h	34	816	28,57	443,333	481,593	420,583	460,292	460,093	479,752

(¹)- Massas unicamente dos provetes no início do ensaio (08/11/2017): B_PN2 = 181,12 g; C_PN2 = 206,6 g; F_PN3 = 172,22 g; L_PN7 = 192,43 g; L_PN8 = 192,57 g; L_PN9 = 207,94 g

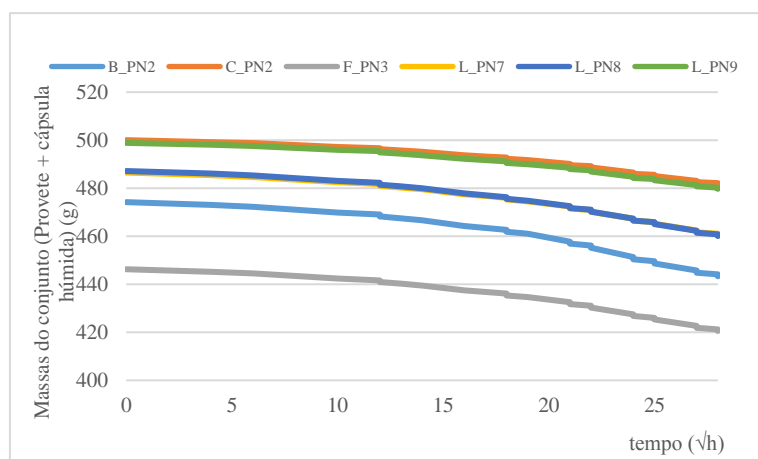


Figura 4.18 Valores de massas obtidos no ensaio de permeabilidade para os provetes sem tratamento (PN)

Tabela 4.8 Registo de massas durante o ensaio de permeabilidade ao vapor de água dos conjuntos ‘cápsula húmida+provetes’ dos provetes consolidados, ao longo do tempo de ensaio.

Data	Dias	Horas	Horas ^{1/2}	Massas do conjunto (Provetes + cápsula húmida) ⁽¹⁾ (g)					
				B_PC2	C_PC2	F_PC3	L_PC7	L_PC8	L_PC9
08-11-2017 - 12:00 h	0	0	0,00	470,424	480,739	485,670	500,133	496,938	492,084
09-11-2017 - 12:00 h	1	24	4,90	469,652	480,319	485,303	499,567	496,490	491,532
10-11-2017 - 12:00 h	2	48	6,93	469,043	479,955	484,892	499,031	496,032	490,980
13-11-2017 - 12:00 h	5	120	10,95	467,172	478,762	483,405	497,355	494,583	489,222
14-11-2017 - 12:10 h	6	144	12,00	466,526	478,349	482,892	496,784	494,086	488,622
15-11-2017 - 12:00 h	7	168	12,96	465,902	477,949	482,390	496,226	493,601	488,035
16-11-2017 - 12:00 h	8	192	13,86	465,278	477,549	481,889	495,668	493,114	487,447
17-11-2017 - 12:15 h	9	216	14,70	464,651	477,150	481,390	495,111	492,630	486,857
20-11-2017 - 12:00 h	12	288	16,97	462,877	476,027	479,986	493,530	491,256	485,202
21-11-2017 - 12:00 h	13	312	17,66	462,237	475,610	479,463	492,958	490,753	484,594
22-11-2017 - 12:00 h	14	336	18,33	461,625	475,217	478,971	492,410	490,276	484,017
23-11-2017 - 12:00 h	15	360	18,97	460,994	474,818	478,467	491,846	489,783	483,420
24-11-2017 - 12:00 h	16	384	19,60	460,384	474,430	477,981	491,300	489,307	482,850
27-11-2017 - 12:00 h	19	456	21,35	458,430	473,201	476,432	489,632	487,865	481,096
28-11-2017 - 12:30 h	20	480	21,91	457,801	472,801	475,936	489,086	487,388	480,520
29-11-2017 - 12:00 h	21	504	22,45	457,172	472,401	475,439	488,536	486,911	479,944
30-11-2017 - 11:30 h	22	528	22,98	456,525	471,988	474,928	487,977	486,420	479,351
04-12-2017 - 11:30 h	25	600	24,49	453,993	470,380	472,933	485,786	484,503	477,037
05-12-2017 - 12:00 h	26	624	24,98	453,357	469,976	472,431	485,292	484,026	476,458
06-12-2017 - 12:00 h	27	648	25,46	452,732	469,582	471,940	484,692	483,548	475,887
07-12-2017 - 12:10 h	28	672	25,92	452,138	469,212	471,470	484,168	483,098	475,344
11-12-2017 - 12:00 h	31	744	27,28	449,784	467,729	469,605	482,096	481,290	473,171
12-12-2017 - 12:00 h	32	768	27,71	449,100	467,284	469,049	481,499	480,769	472,540
13-12-2017 - 12:00 h	33	792	28,14	448,540	466,934	468,606	481,006	480,335	472,021
14-12-2017 - 12:00 h	34	816	28,57	447,912	466,535	468,103	480,455	479,853	471,441

⁽¹⁾- Massas unicamente dos provetes no início do ensaio (08/11/2017): B_PC2 = 198,29 g; C_PC2 = 212,67 g; F_PC3 = 194,49 g; L_PC7 = 203,59 g; L_PC8 = 203,64 g; L_PC9 = 205,43 g

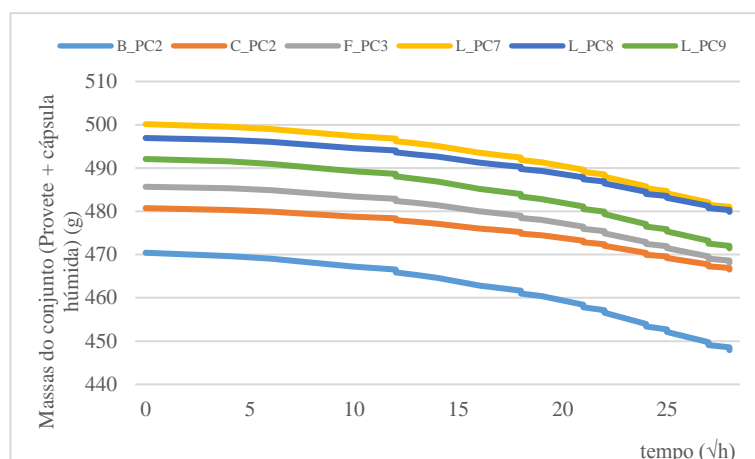


Figura 4.19 Valores de massas obtidos no ensaio de permeabilidade para os provetes consolidados (PC)

Na Tabela 4.9 indicam-se os resultados da determinação do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água dos provetes (seis sem tratamento e seis consolidados por capilaridade), representado pela sua média.

Tabela 4.9 - Valores médios do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água, π dos provetes naturais e consolidados, ao longo do tempo de ensaio

Provetes	Tipo	Permeabilidade média ao vapor de água, π (kg/m.s.Pa)
B_PN2, C_PN2, F_PN3, L_PN7, L_PN8, L_PN9	Natural	1,49E-10
B_PC2, C_PC2, F_PC3, L_PC7, L_PC8, L_PC9	Consolidado	1,16E-10

4.5.2.3 Absorção de água por capilaridade

O ensaio de absorção de água por capilaridade tem como objetivo a medição da quantidade de água que é absorvida pelo provete em contacto com água, com condições higrotérmicas do ar (temperatura e humidade relativa) controladas. Todo o procedimento experimental foi realizado tendo como base a norma NP EN 1925 (IPQ, 2000).

A realização deste ensaio sucede-se ao ensaio de resistência à tração por flexão, onde se obtiveram duas metades de cada provete, uma metade utilizada para o ensaio de resistência à rotura em compressão e a outra metade para este ensaio. Todos os provetes resultantes de ensaio de flexão foram cortados, à serra, utilizando a quantidade mínima de água necessária para que não houvesse dano sobre as amostras, de modo que todos tivessem as mesmas dimensões (50 mm). De seguida, os provetes foram colocados em estufa ventilada a 70 °C até atingirem uma massa constante. Posteriormente foram deixados a arrefecer à temperatura ambiente e feita a primeira pesagem após secagem. As pesagens foram realizadas recorrendo a uma balança com precisão de 0,01 g.

O processo prosseguiu com a preparação de uma caixa que simula um ambiente saturado, com uma lâmina de água com 3 mm. Os provetes foram colocados no interior da caixa em grupos de três, no início, para que fosse possível realizar as pesagens de acordo com os intervalos de tempo

definidos pela norma e dentro do intervalo de $\pm 5\%$ (Figura 4.20). A seleção dos intervalos depende do tipo de pedra e, para pedras muito absorventes como é o caso do material em estudo, a norma indica que sejam pesadas, para além do instante inicial t_0 , aos 1, 3, 5, 10, 15, 30, 60, 480, 1440 minutos, e posteriormente de 24 em 24 horas, sendo necessárias pelo menos sete medições. As pesagens são realizadas retirando o provete do interior da caixa, limpando a base num pano húmido para retirar apenas o excesso de água e voltando a colocá-lo na caixa. É importante que a caixa permaneça fechada, salvo quando se retira ou se volta a introduzir um provete para pesagem, para que o ambiente no interior permaneça saturado.

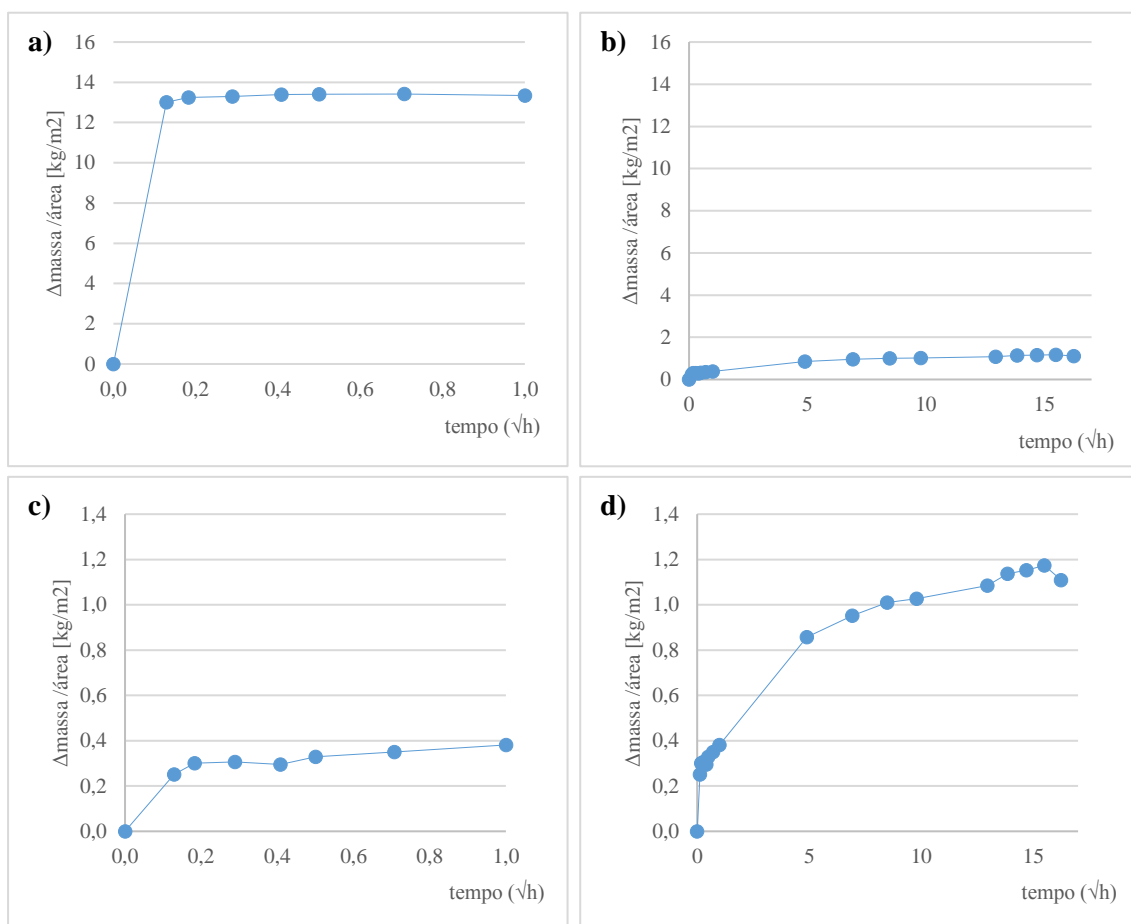


Figura 4.20 - Ensaio de absorção de água por capilaridade

Para efeitos de cálculo, a determinação da massa de água absorvida por unidade de superfície é obtida através da equação 4.6, onde m representa a massa de água absorvida em kg/m^2 , m_i a massa do provete no instante em que é realizada a medição, m_0 a massa do provete seco no início do ensaio e A a área da secção em contacto com a água, em m^2 .

$$m = \frac{m_i - m_0}{A} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4.6)$$

Com os valores registados, traça-se o gráfico correspondente à absorção de água por capilaridade ao longo do tempo, até se atingir massa constante, com abcissas em t [$\sqrt{\text{hora}}$] e ordenadas em kg/m^2 (Figura 4.21). Através da inclinação do troço inicial é determinado, para cada provete, o coeficiente de capilaridade (CC), bem como o valor assintótico (VA) definido pela assíntota horizontal do gráfico. Os valores médios destes parâmetros encontram-se apresentados na Tabela 4.10.



a) Provetes não-consolidados (NT); b) Provetes consolidados (PC); c) provetes consolidados (PC) ao fim de 1 hora de ensaio; d) provetes consolidados (PC) em função do tempo total de ensaio

Figura 4.21 - Valores médios das curvas de capilaridade

Tabela 4.10 – Valores médios dos coeficientes de capilaridade e valor assintótico no ensaio de capilaridade para os provetes sem tratamento e consolidados

Parâmetro	Natural	Consolidado
CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]	12,38	0,03
VA (kg/m ²)	12,82	1,10

4.5.2.4 Ensaio de secagem

O ensaio de secagem vem no seguimento do ensaio de capilaridade e tem como objetivo medir o tempo de secagem dos provetes, em determinadas condições de temperatura e humidade relativa, fazendo a relação da variação de massa de água nos provetes, a área de secagem e o tempo decorrido de ensaio. Os procedimentos adotados tiveram como base a norma EN 16322 (CEN, 2013). Os provetes utilizados foram os mesmos que os do ensaio de capilaridade, e terminado este, deu-se início ao ensaio em causa. A norma requer que assim que os provetes sejam retirados da caixa e que sejam saturados através de absorção de água por capilaridade durante 24h. Ao fim deste tempo, foram totalmente imersos até se alcançar massa constante. Depois desta imersão, foi retirado o excesso de água das superfícies dos provetes e todas elas foram seladas com um filme

de polietileno e elásticos, exceto a superfície de teste (topo dos provetes), por onde se deu a saída de vapor de água (Figura 4.22). O comportamento de secagem dos provetes é analisado através de pesagens sucessivas que foram realizadas de 10 em 10 minutos durante a primeira hora, e posteriormente foram realizadas duas medições por dia até se atingir massa constante, com o auxílio de balança de 0,01 g de precisão. Estes intervalos devem ser escolhidos em função do tipo de material em estudo e, tendo em conta de se tratar de um arenito muito poroso, os intervalos foram mais curtos do que se fossem considerados outros tipos de pedra.



Figura 4.22 - Ensaio de secagem.

Para efeitos de cálculo, a quantidade de água nos provetes por unidade de área de superfície num determinado intervalo de tempo, é dada pela seguinte expressão (equação 4.7).

$$M_i = \frac{m_i - m_f}{A} \quad [\text{kg/m}^2] \quad (4.7)$$

Onde m_i representa a massa do provete no instante i , em kg, m_f a massa do provete no final de cada ensaio, em kg, e A a área da superfície de secagem, em m^2 .

Em relação ao cálculo da taxa de secagem (TS), a norma refere duas fases distintas, TS_1 e TS_2 . A taxa de secagem referente à primeira fase (TS_1) é calculada pelo declive negativo do troço inicial da curva de secagem, utilizando pelo menos cinco pontos, através de uma regressão linear. Para esta primeira fase, a ordenada do gráfico é representada em função do tempo, em horas.

A segunda fase representa-se pelo declive negativo da curva de secagem, no intervalo de tempo que corresponde à secção linear da mesma, e os valores são apresentados, na ordenada, em função da raiz quadrada do tempo, em horas^{1/2}. Durante esta fase, a quantidade de água que percola em direção à superfície diminui, deixando mesmo de existir transporte de água líquida, passando a existir apenas evaporação de água no estado gasoso.

Um outro índice foi calculado e que é benéfico para a caracterização das propriedades de secagem do arenito, o índice de secagem (*IS*), é particularmente importante para materiais que não apresentem curvas de secagem explícitas e representa o comportamento global do arenito durante o processo de secagem. Este índice depende fortemente da duração do ensaio e serve como fonte de comparação entre métodos, sendo calculado através da equação 4.8.

$$IS = \int_0^{t_f} \frac{M_i dt}{M_{máx} \times t_f} \quad [\text{adim.}] \quad (4.8)$$

As curvas dos valores médios de secagem obtidas para os provetes sem tratamento e para os provetes consolidados, em função do tempo e da raiz quadrada do tempo, são apresentadas nas Figuras 4.23.

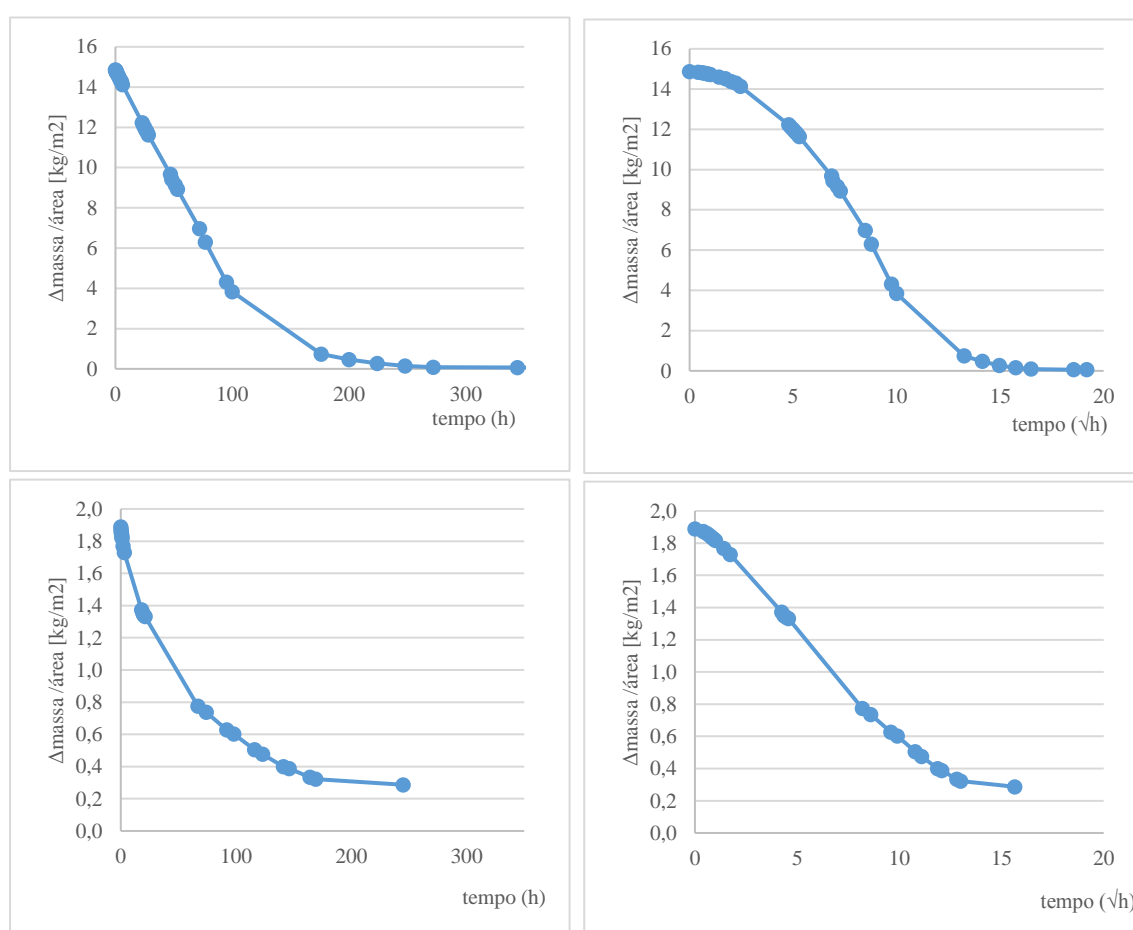


Figura 4.23 - Curvas de secagem dos provetes sem tratamento e consolidados, em função do tempo e da raiz quadrada do tempo

Observa-se que as curvas são muito idênticas, no entanto, no caso dos provetes naturais a variação da quantidade de água nos provetes é cerca de sete vezes superior à quantidade presente nos provetes consolidados. Em relação às taxas de secagem, observa-se que o declive inicial das curvas dos provetes sem tratamento é superior aos provetes tratados com TG, o que se traduz em valores de TS1 superiores. Da mesma forma, em relação à secção linear da curva, quando analisando a secagem em função da raiz quadrada do tempo, esta apresenta maior declive para os

provetes não-tratados do que os consolidados. Em geral, a quantidade de água que evapora através da secção aberta é muito superior nos provetes sem consolidação em relação aos restantes. A Tabela 4.11 apresenta os valores médios dos parâmetros já descritos para os provetes no estado natural e consolidados.

Tabela 4.11 - Valores médios das taxas de secagem e valor índice de secagem no ensaio de secagem para os provetes sem tratamento e consolidados

Parâmetro	Natural	Consolidado
TS1 [kg/(m2.h)]	0,11	0,02
TS2 [kg/(m2.h)]	1,49	0,10
IS	0,28	0,32

4.5.2.5 Velocidade de ultrassons

O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado com equipamento Pundit Lab de marca Proceq® e com transdutores de ponta de 54 kHz de frequência. O ensaio foi realizado nos provetes sem tratamento e consolidados com TG, segundo a norma EN 14579 (CEN, 2007) para pedras naturais. A medição da distância entre os transdutores corresponde à altura dos provetes. O bom acoplamento dos transdutores na pedra, necessário para existir um bom contacto acústico, foi assegurado através de vaselina, pressionando o transdutor de encontro à superfície desta (Figura 4.24).



a) Medição da velocidade de ultrassons; b) equipamento de medição das velocidades; c) transdutor de ponta

Figura 4.24 Ensaio de propagação de ultrassons

Foram registados os intervalos de tempo indicados pelo aparelho eletrónico e a expressão dos resultados é dada pela equação 4.9, onde V é a velocidade do impulso em km/s, L , a distância de percurso em mm e passada a km e T , o tempo despendido pelo impulso para percorrer o trajeto, em μ s e passada a segundos.

$$V = \frac{L}{T} \quad [\text{km/s}] \quad (4.9)$$

Os resultados obtidos no ensaio de propagação de sons para os provetes sem tratamento e para os provetes sujeitos a consolidação por capilaridade estão representados na Figura 4.25. Pode observar-se que em todos os provetes consolidados registou-se um aumento da velocidade com que as ondas os atravessam em relação aos provetes sem tratamento.

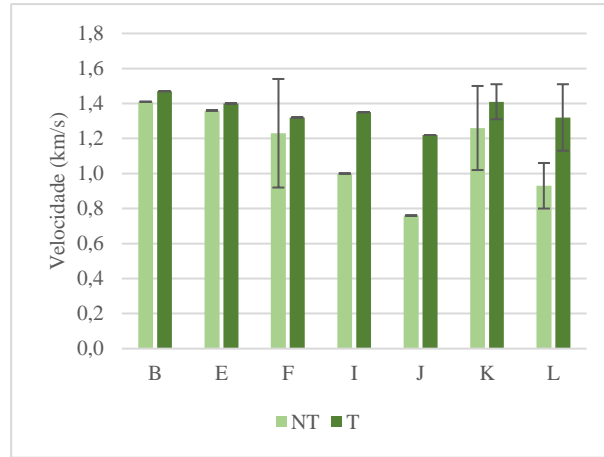


Figura 4.25 - Valores de velocidades obtidos para o ensaio de propagação de sons em provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)

4.5.2.6 Módulo de elasticidade dinâmico

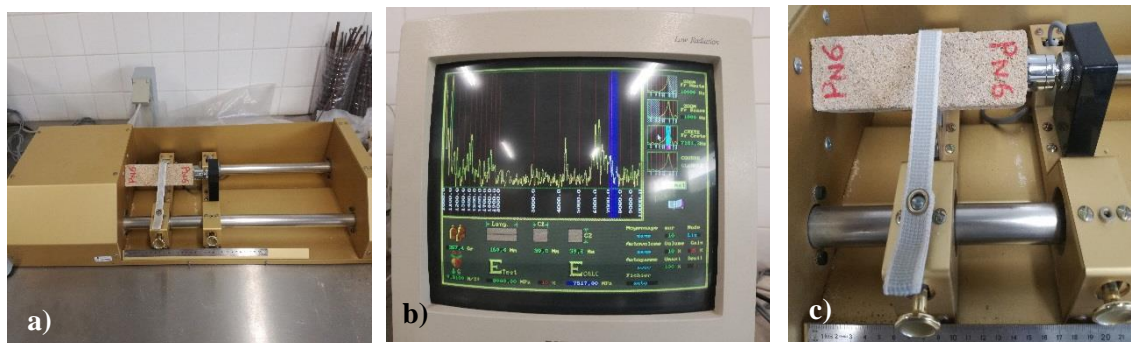
A determinação do módulo de elasticidade dinâmico teve por base a norma NP EN 14146 (IPQ, 2006), que estabelece procedimentos para a determinação da frequência fundamental de ressonância para uma vibração induzida na direção longitudinal de provetes de pedra natural.

Os provetes foram colocados no suporte do equipamento “ZEUS Resonance Meter”, com um dos topos em contacto com o emissor de ultrassons e o outro em contacto com o recetor. O equipamento possui em anexo um *software* de cálculo automático, onde foram introduzidas as dimensões, em milímetros, e a massa, em gramas, de cada provete ensaiado. O ensaio tem início após a inserção destes elementos, registando-se os valores que o equipamento determina automaticamente, rodando-se o provete em cada ensaio por forma a obter quatro medições, duas em cada topo e calculando a média e o respetivo desvio-padrão (Figura 4.26).

O programa acoplado ao equipamento apresenta valores automáticos para o módulo de elasticidade dinâmico E_d , em N/mm², de acordo com a equação 4.10.

$$E_d = (2 \times l \times f_0)^2 \times \frac{\rho}{g} \times 10^{-6} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (4.10)$$

Com o comprimento do provete, l , em metros, a frequência de ressonância longitudinal, f_0 , em Hz, o peso volúmico do material, ρ , em N/mm³ e a aceleração da gravidade, g , em m/s².



a) Equipamento para determinação do E_d ; b) Leitura dos valores de E_d ; c) Disposição dos provetes durante o ensaio

Figura 4.26 - Ensaio do módulo de elasticidade dinâmico

O módulo de elasticidade dinâmico foi obtido através da média aritmética das quatro medições realizadas em cada um dos provetes, no estado natural e no consolidado. Os resultados médios obtidos para cada um dos provetes são apresentados na Figura 4.27.

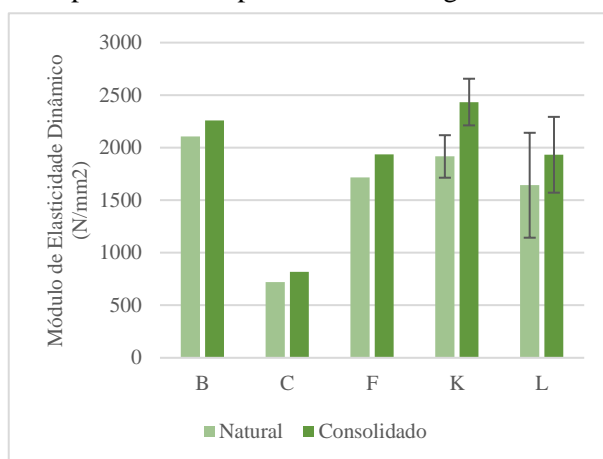


Figura 4.27 - Resultados obtidos de E_d para os provetes não-tratados (NT) e com tratamento (T)

Comparando os resultados obtidos dos provetes com e sem tratamento, verifica-se que houve um aumento do módulo de elasticidade, bem como do desvio padrão associado. Todos os provetes têm as dimensões-padrão, exceto os da amostra C, onde os mesmos têm cerca de 10 cm de comprimento, o que justifica valores mais baixos.

4.5.2.7 Resistência à tração por flexão

O ensaio de resistência à tração foi conduzido segundo a norma NP EN 12372 (CEN, 2008) através de equipamento para o efeito – uma máquina universal de força Zwick Rowell Z050 que, neste ensaio em concreto, aplica uma carga pontual através de uma célula de carga de 2 kN a uma velocidade, dada em termos de força pela norma, de 0,1 kN/s.

Os provetes são colocados num suporte, apoiados nos topos, distanciados entre si de 100 mm. O início do ensaio dá-se com a ponta da célula de carga aplicada a meio vão do provete, sendo registada, num gráfico força - deslocamento no *software* do equipamento, a força de tração através da flexão das amostras (Figura 4.28). O ensaio termina quando o provete atinge a rotura, registando-se a força máxima de tração, F_t , em Newton.



Figura 4.28 Ensaio de resistência à tração por flexão dos provetes

A resistência à tração por flexão, R_t , expressa em N/mm^2 , é determinada através da equação 4.11.

$$R_t = \frac{1,5 \times F_t \times L}{b^3} \quad [\text{N/mm}^2] \quad (1.11)$$

Onde F_t representa a força máxima de tração, expressa em N, L representa a distância entre apoios, em milímetros (100 mm) e b representa o lado da secção quadrada de um provete prismático, em milímetros (40 mm). Na Figura 4.29 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à tração por flexão dos provetes de material arenítico quando sujeitos a consolidação por capilaridade e as respetivas variações.

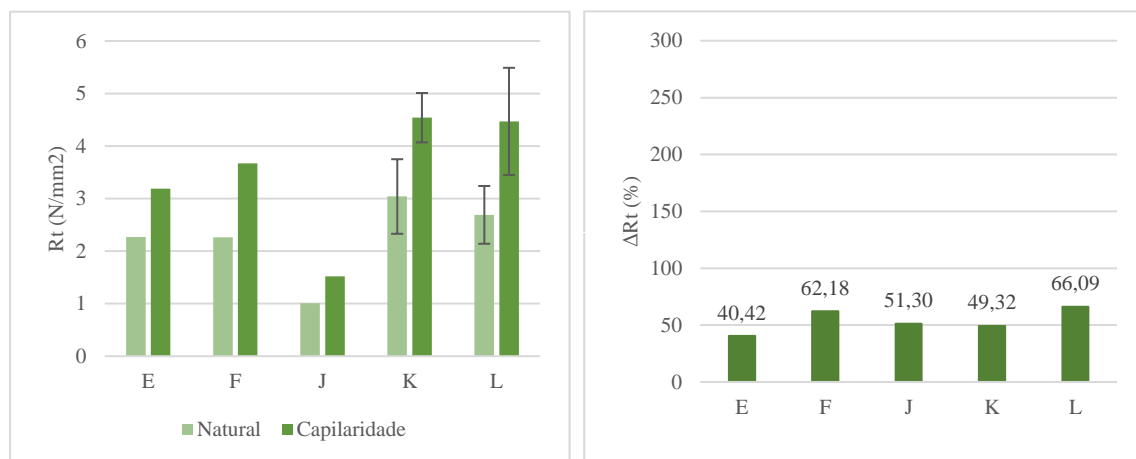


Figura 4.29 - Resultados obtidos para a resistência à tração por flexão e as respetivas variações

Verifica-se através da análise do gráfico que houve um aumento de resistência à tração em todos os provetes, qualquer que seja a amostra. A Figura 4.30 mostra a comparação entre as resistências à tração por flexão no estado natural, sem tratamento, e através da consolidação por imersão e por pincelagem. Conclui-se que os valores médios são praticamente iguais; no entanto o desvio-padrão dos provetes tratados com pincel apresentam o dobro do valor em relação aos provetes imergidos por capilaridade. Esta diferença deve-se ao facto de um dos provetes tratados através de pincelagem apresentar valores muito elevados de resistência em relação aos restantes, o que pode ser justificado pelo método de pincelagem induzir uma concentração de produto consolidante mais à superfície o que provocou maiores valores de resistências à tração por flexão.

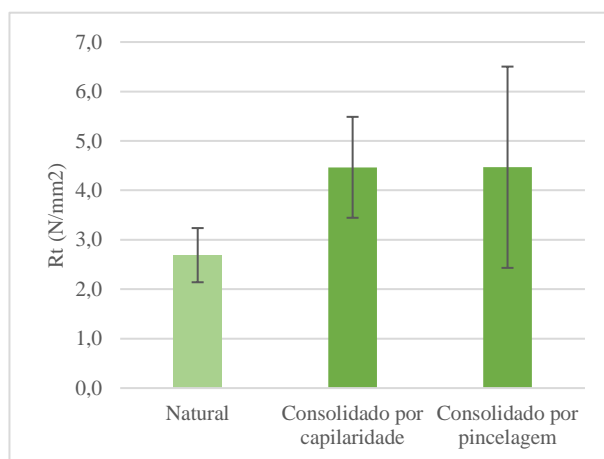


Figura 4.30 - Resultados obtidos de R_t para o estado natural e consolidado por capilaridade e por pincelagem

4.5.2.8 Resistência à rotura em compressão uniaxial

O ensaio de resistência à compressão é realizado com o mesmo equipamento que o ensaio referido anteriormente (Zwick Rowell Z050) e segue a norma NP EN 1926 (CEN, 2008), com a diferença que no caso presente a carga é aplicada diretamente num suporte metálico que envolve o provete, para onde aquela é transferida através do contacto entre o suporte e os pratos da prensa (Figura 4.31). Este ensaio é realizado com uma das metades dos provetes resultantes do ensaio de resistência à tração por flexão, e utiliza uma célula de carga de 50 kN a uma velocidade constante de 1,6 kN/s. Os meios provetes são então colocados no suporte metálico com secção 40 mm x 40 mm e o ensaio inicia-se à velocidade indicada até à rotura da amostra, sendo registado no gráfico força - deslocamento, traçado pelo software do equipamento, a força máxima de compressão F_c , em N.



a) Equipamento utilizado para a determinação de R_t e R_c ; b) e c) “meio-provete” durante o ensaio

Figura 4.31 - Ensaio de resistência à compressão

A resistência à compressão R_c , expressa em N/mm^2 , é determinada através do quociente entre a força máxima registada em cada ensaio, F_c , em N, e a área da secção comprimida ($40 \times 40 = 1600 \text{ mm}^2$), através da equação 4.12

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (4.12)$$

Na Figura 4.32 apresentam-se os resultados obtidos para a resistência à compressão dos provetes de material arenítico sem tratamento e quando sujeitos a consolidação por capilaridade e as respectivas variações.

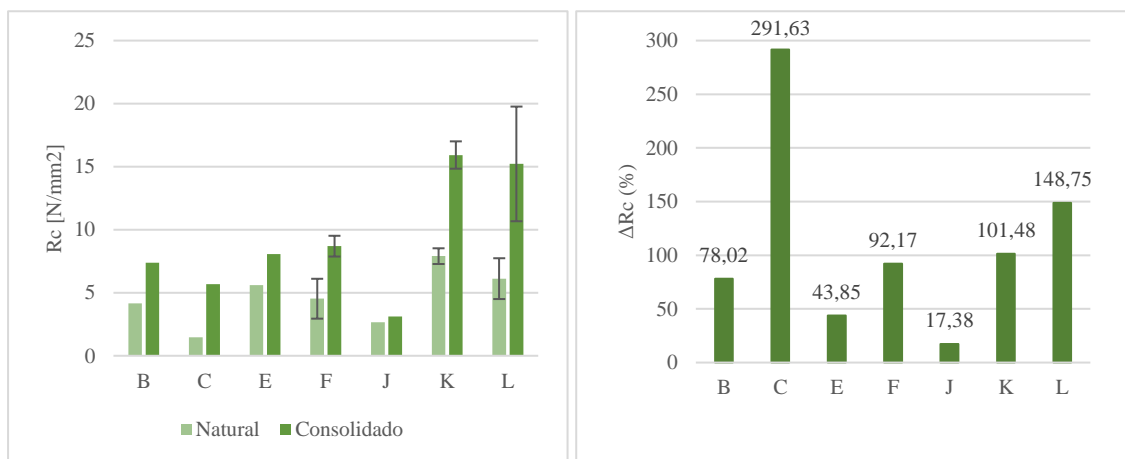


Figura 4.32 - Resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão entre os dois tipos de provetes e as respectivas variações de resistências

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão mostram que, independentemente da origem do provete, o arenito consolidado apresentou sempre valores de resistência superiores em relação ao seu estado inicial. A Figura 4.32 mostra os resultados do mesmo ensaio quando os provetes da mesma pedra de origem foram consolidados por imersão e por pincelagem. Pode-se concluir que o aumento de resistência é bastante superior quando consolidados através do primeiro método, tendo o método de consolidação por pincelagem fornecido um aumento ligeiro.

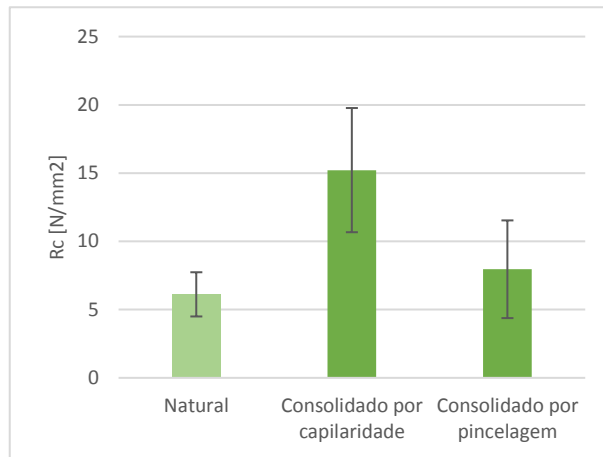


Figura 4.33 - Resultados obtidos de R_c para o estado natural, consolidado por capilaridade e por pincelagem da amostra L

Capítulo 5 - Análise e discussão dos resultados

5.1 Considerações iniciais

No presente capítulo são apresentados todos os resultados dos ensaios realizados durante a campanha experimental, pela mesma ordem com que foram descritos previamente no capítulo anterior. São comparados os resultados obtidos com os resultados provenientes da pesquisa bibliográfica realizada. Os resultados individuais são apresentados em anexo.

5.2 Provete prismáticos e cilíndricos

5.2.1 Massa volúmica aparente e porosidade aberta

Os resultados, obtidos de acordo com o descrito no subcapítulo 4.5.2.4, são apresentados na figura 5.1.

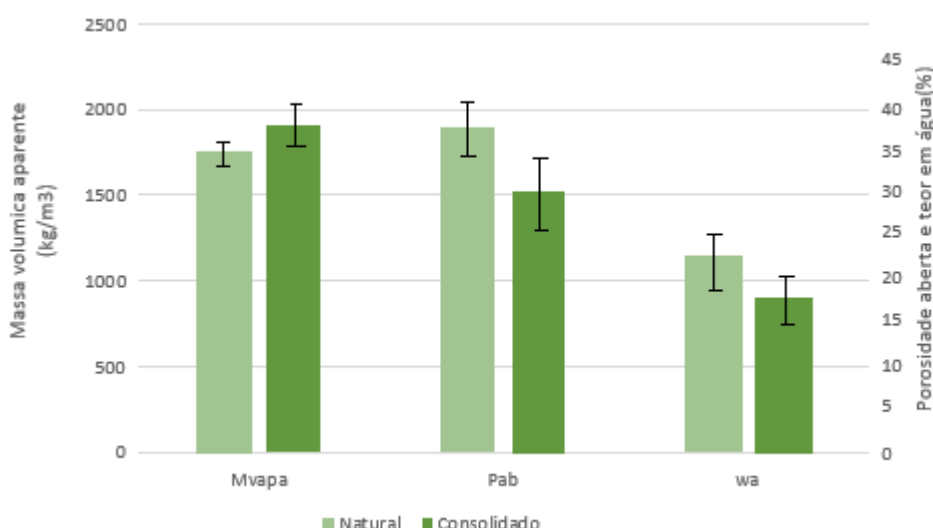


Figura 5.1 - Médias dos valores obtidos da massa volúmica aparente, porosidade aberta e teor em água para os provetes sem tratamento e consolidados

De acordo com os resultados apresentados é possível perceber que existe um aumento da massa volúmica do estado natural para o consolidado que resulta do preenchimento dos poros por parte do líquido consolidante, enquanto a porosidade aberta e o teor em água (do provete saturado) diminuem do estado inicial para o estado consolidado, motivado pelo efeito do produto consolidante no interior dos provetes, após o processo de secagem.

Comparando com os valores presentes na Tabela 5.1, os valores de massa volúmica obtidos são semelhantes aos resultados obtidos por Marques (2008) e Tiano et al. (2000), no entanto um pouco inferiores. Em relação à porosidade aberta, apenas o trabalho de Clercq et al. (2007) tem um valor superior em provetes não tratados, com 41 % de vazios. Em relação ao efeito consolidante sobre

este parâmetro, os resultados obtidos são muito semelhantes às variações encontradas em Clercq et al. (*op.cit.*) e Graziani et al. (2015), tendo-se observado variações muito reduzidas em Sassoni et al. (2013) e por outro lado, variações superiores a 100 % no trabalho de Tiano et al. (2000). Apesar dos valores de porosidade serem inferiores aos obtidos no presente estudo, obtiveram uma maior diminuição no valor de porosidade com o mesmo método de aplicação, o que pode estar relacionado com o tempo de cura dos provetes. Em Tiano et al. (2000) o processo de aplicação foi repetido duas vezes com um intervalo de 24h e o tempo de cura foi superior a três semanas, defendendo ser o tempo necessário para todos os processos químicos estarem completos, contrastando com as 48 h de cura no presente trabalho.

Tabela 5.1 - Resultados obtidos de massas volúmicas e porosidade aberta por outros autores e no presente estudo.

Referência	ρ [kg/m ³]	n [%]	
		Natural	Consolidado
Tiano et al. (2000) ⁽¹⁾	2160 - 2670	19,2 ± 0,7	9,2 ± 0,2
		12,4 ± 0,3	4,9 ± 0,3
Clercq et al. (2007)	1370 ± 10	41,0	33,0
Rodrigues, (2008)	2711 ± 3	27,2	-
Marques, (2008)	2179 - 2343	-	-
Sassoni et al., (2013)	-	21,5	20,3
Graziani et al. (2015)	-	36,7	27,6
Presente estudo	1754,7 ± 84,6	38,2 ± 3,1	30,3 ± 5,3

5.2.2 Permeabilidade ao vapor de água

Este ensaio, como descrito no subcapítulo 4.5.2.5, permitiu determinar o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água através da variação da massa dos conjuntos ‘provetes + cápsula húmida’. Como se pode observar pela figura 5.2, a perda de massa nos provetes no estado natural (NT), que corresponde à quantidade de vapor de água presente no interior da cápsula, é superior aos provetes sujeitos a consolidação. Em média, o conjunto ‘provetes + cápsula’ sem tratamento reduziu a sua massa cerca de 25 g, enquanto os conjuntos dos provetes consolidados diminuíram cerca de 19 g. Esta variação traduz-se numa diminuição de cerca de 24 % da taxa de transmissão de vapor de água devido ao efeito consolidante do silicato de etilo no interior dos provetes consolidados. Conclui-se que esta diminuição provocada pelo tratamento consolidante retarda a passagem de vapor de água através do provete o que pode significar que no seu interior pode ficar retida alguma humidade, o que pode resultar em possíveis degradações no seu interior.

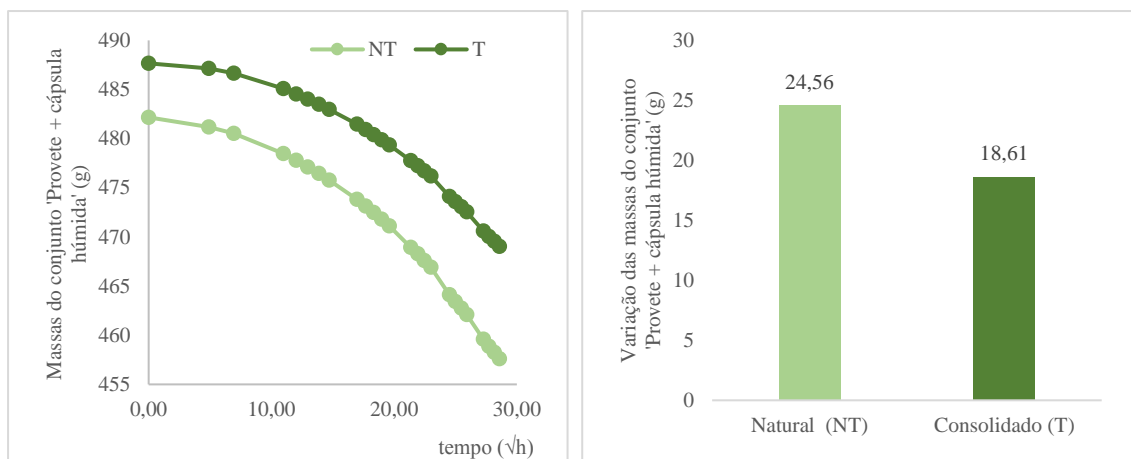


Figura 5.2 - Evolução média das massas dos provetes não-tratados (PN) e dos provetes com tratamento (PC) em função da raiz do tempo e respetiva variação

A Tabela 5.2 apresenta os resultados de outros autores e pode observar-se que não foram encontrado nenhum par de resultados com a mesma ordem de grandeza. É possível observar que nos três estudos em que foi realizado um tratamento com consolidantes os valores de permeabilidade diminuíram o que significa que o consolidante torna o material pétreo mais impermeável à passagem de líquido. Os resultados obtidos por Watsantachad (2001) representam aqueles em que os valores de permeabilidade são mais baixos e que correspondem ao caso em que a porosidade é mais baixa (12,78 %); no entanto a porosidade encontrada em Luo (2015) é de 14,4 % sem tratamento e nos provetes do presente estudo obteve-se um valor de cerca de 38 %, correspondendo, mesmo assim, a uma permeabilidade mais baixa em comparação com aquele. Os arenitos estudados por Traska (2014), não sujeitos a tratamento de consolidação, apresentam um valor de permeabilidade ao vapor muito inferior aos que se observaram em Luo (2015) apesar de terem um valor de 22,58 % de porosidade aberta, superior à daqueles.

Tabela 5.2 - Resultados obtidos do valor de permeabilidade ao vapor de água, π por outros autores e do presente estudo

Referência	Método	Permeabilidade ao vapor de água, π (kg/m.s.Pa)	
		Natural	Consolidado
Watsantachad (2001)	Capilaridade	$8,46 \times 10^{-16}$	$3,07 \times 10^{-16}$
Traska (2015)	-	$2,22 \times 10^{-13}$	-
Luo (2015)	Pincelagem	$7,96 \pm 0,75 \times 10^{-8}$	$7,12 \pm 0,51 \times 10^{-8}$
Presente estudo	Capilaridade	$1,49 \pm 0,27 \times 10^{-10}$	$1,16 \pm 0,18 \times 10^{-10}$

Pode-se afirmar que a porosidade em si não controla a permeabilidade do material mas sim a tortuosidade dos grãos, ou seja, a morfologia do caminho que o vapor de água tem de percorrer, o que pode inibir a passagem de fluidos por eles. Por esta razão, valores elevados de porosidade também podem estar associados a materiais impermeáveis (como é o caso das argilas) e como se pode observar valores mais baixos de porosidade podem corresponder a valores de permeabilidade superiores.

5.2.3 Absorção de água por capilaridade

Em relação ao ensaio de absorção de água por capilaridade, descrito em 4.5.2.6, são analisados os valores do coeficiente de capilaridade (CC) e o valor assintótico (VA) obtidos através das curvas de capilaridade. Por se tratar de um material extremamente poroso foram obtidas curvas muito inclinadas para o estado natural, onde a absorção é feita de forma rápida e, em poucos segundos a água ocupa todos os vazios dos cubos. No caso dos provetes consolidados, o efeito consolidante enibe que a água penetre nos vazios com a mesma velocidade que o caso anterior, não existindo variação instantânea de cor, correspondendo a curvas iniciais menos inclinadas, e por isto, valores mais reduzidos de CC.

A Figura 5.3 mostra o comportamento das curvas de capilaridade dos provetes no estado natural e no estado consolidado. Pode-se observar que a absorção de água nos provetes sem tratamento é feita de forma rápida, atingindo o valor assintótico ao fim de poucos segundos. Em relação aos provetes consolidados o seu comportamento é irregular e a quantidade de água absorvida é muito inferior.

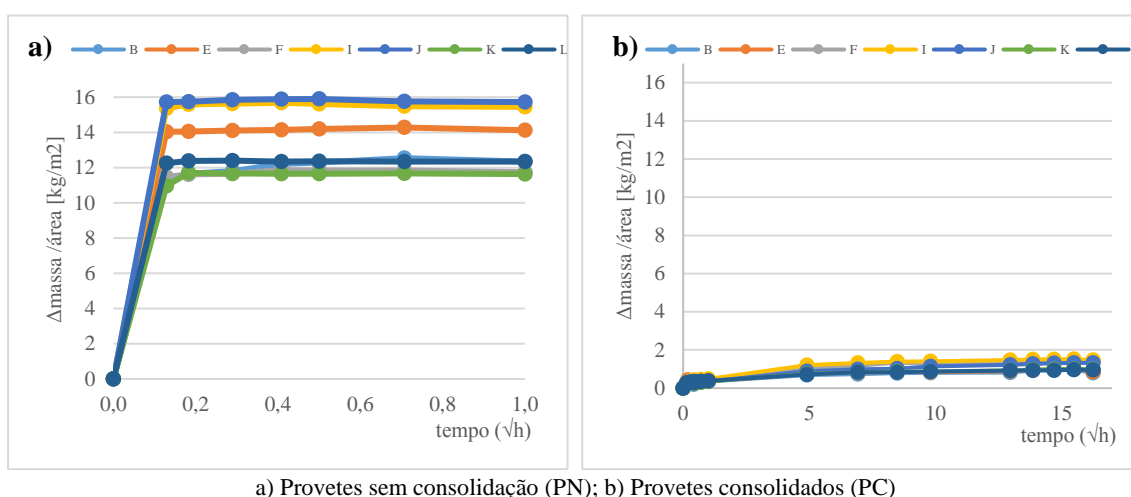
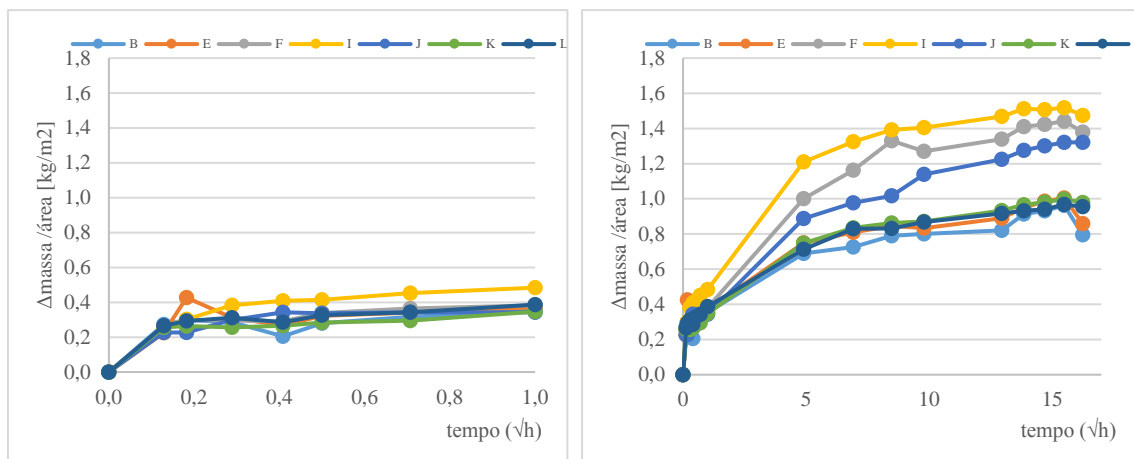


Figura 5.3 - Curvas de capilaridade, em função da raiz quadrada do tempo.

Em alguns casos os provetes em contacto com a película de água registaram massas inferiores à medição anterior (Figura 5.4). Este facto pode ser explicado por todas as superfícies estarem em contacto com o ar (exceto a base do provete) e a quantidade de água absorvida pelo provete em alguns momentos ser inferior à velocidade com que a água evapora para o exterior, verificando-se a diminuição da massa do provete.



Curvas de capilaridade de provetes consolidados com o eixo das ordenadas ajustado às funções: a) ao fim de 1 hora de ensaio; b) no tempo total de ensaio

Figura 5.4 - Curvas de capilaridade dos provetes consolidados

Na Figura 5.5 está representado, em gráfico de barras, os valores de CC para os diferentes provetes nos estados natural e consolidado. Conclui-se que os valores de CC diminuem abruptamente entre um estado e o outro, o que confirma o efeito do consolidante em reter a entrada de água para o interior dos provetes sem a reter, permitindo a sua evaporação.

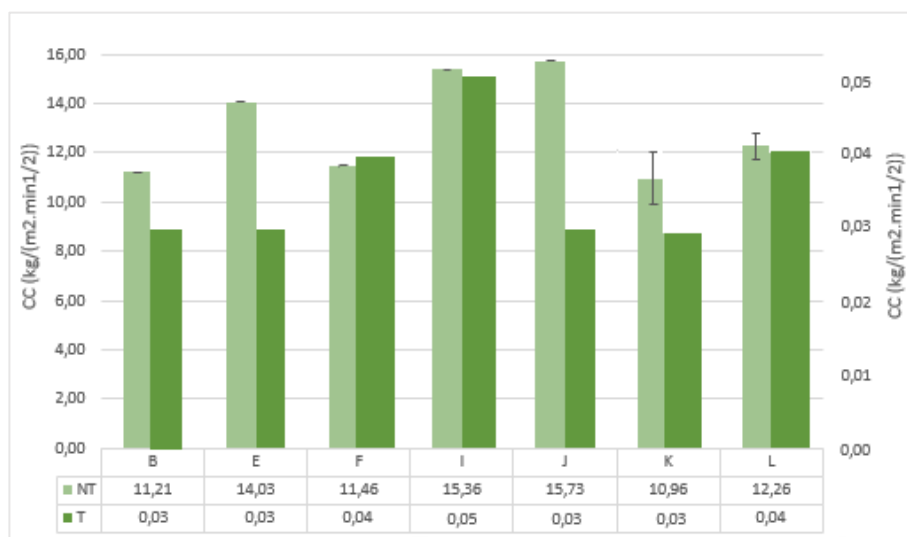


Figura 5.5 - Valores de coeficientes de capilaridade para os provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)

A média de resultados obtidos para o valor de CC para os provetes sem tratamento são muito superiores aos valores encontrados na bibliografia, como se pode ver na Tabela 5.3, tal como o valor encontrado em Taska (2014), também elevado em comparação com os restantes autores. Verifica-se que o efeito consolidante provoca uma diminuição do coeficiente de capilaridade (Ruiz & Su, 2006; Ling et al., 2008; Ruiz et al., 2009), no entanto nenhuma variação foi tão alta como a obtida neste estudo.

Tabela 5.3 Resultados obtidos de coeficientes de absorção do ensaio de capilaridade encontrados na pesquisa bibliográfica e no presente estudo

Referência	Método de aplicação	CC [kg/(m ² .min ^{1/2})]	
		Natural	Consolidado
Buj & Gisbert (2006)	Pincelagem	1,4	-
Ruiz & Su (2006)	n.d	1,44	0,78
Marques (2008)	Imersão parcial	0,76	-
Ling et al. (2008)	Capilaridade	0,53	0,15
Ruiz et al. (2009)	n.d	1,42	0,65
Traska (2014)	-	4,83	-
Presente estudo	Capilaridade	12,38 ± 1,60	0,03 ± 0,01

5.2.4 Ensaio de Secagem

O ensaio de secagem, descrito no subcapítulo 4.5.2.7, permite obter, através das curvas descendentes denominadas de curvas de secagem, os valores da taxa de secagem para duas fases distintas (TS1 e TS2) e do índice de secagem (IS). A Figura 5.6 mostra o comportamento das curvas de secagem para os provetes sem tratamento.

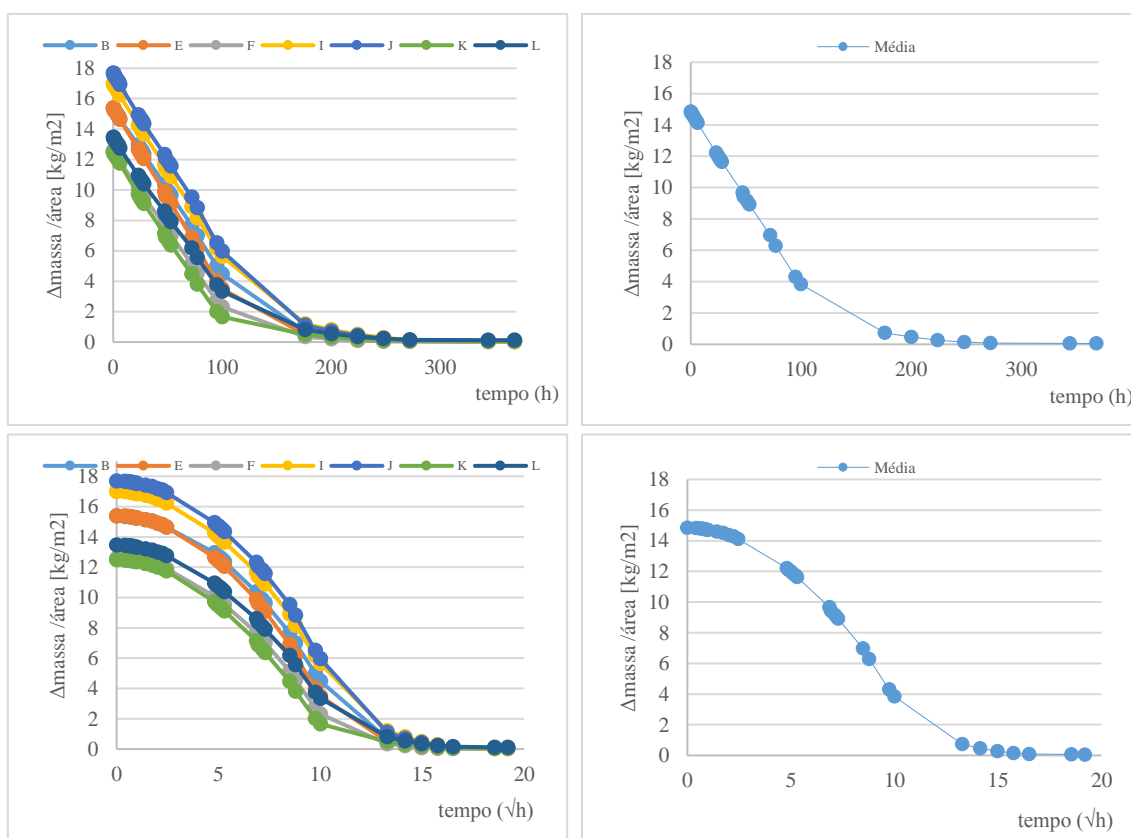


Figura 5.6 - Variação das massas no ensaio de secagem dos provetes sem tratamento e respectivas médias em função do tempo e da raiz do tempo

Através da curva de secagem em função do tempo, é possível observar que o declive do trecho inicial do gráfico é semelhante a todos os provetes das diferentes amostras, com um valor médio de TS1 igual a 0,11 kg/(m².h). Quando se analisa a mesma curva mas em função da raiz quadrada

do tempo, o declive do seu troço reto corresponde à taxa de secagem a qual, relativamente ao total de provetes, patenteia um valor médio igual a $1,56 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})$.

A leitura realizada às curvas de secagem para os provetes no estado natural está traduzida num gráfico de barras, conforme apresentado na Figura 5.7.

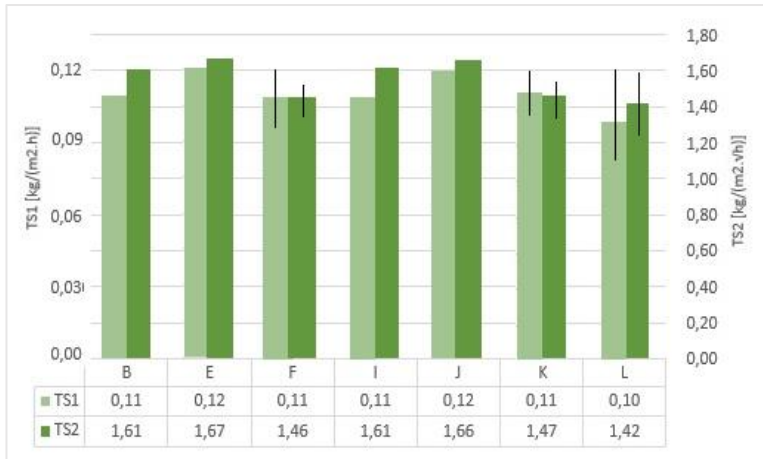


Figura 5.7 - Valores obtidos de TS1 e TS2 das curvas de secagem para os provetes no estado natural (PN)

De forma análoga, a Figura 5.8 apresenta as mesmas curvas de secagem para os provetes sujeitos a consolidação.

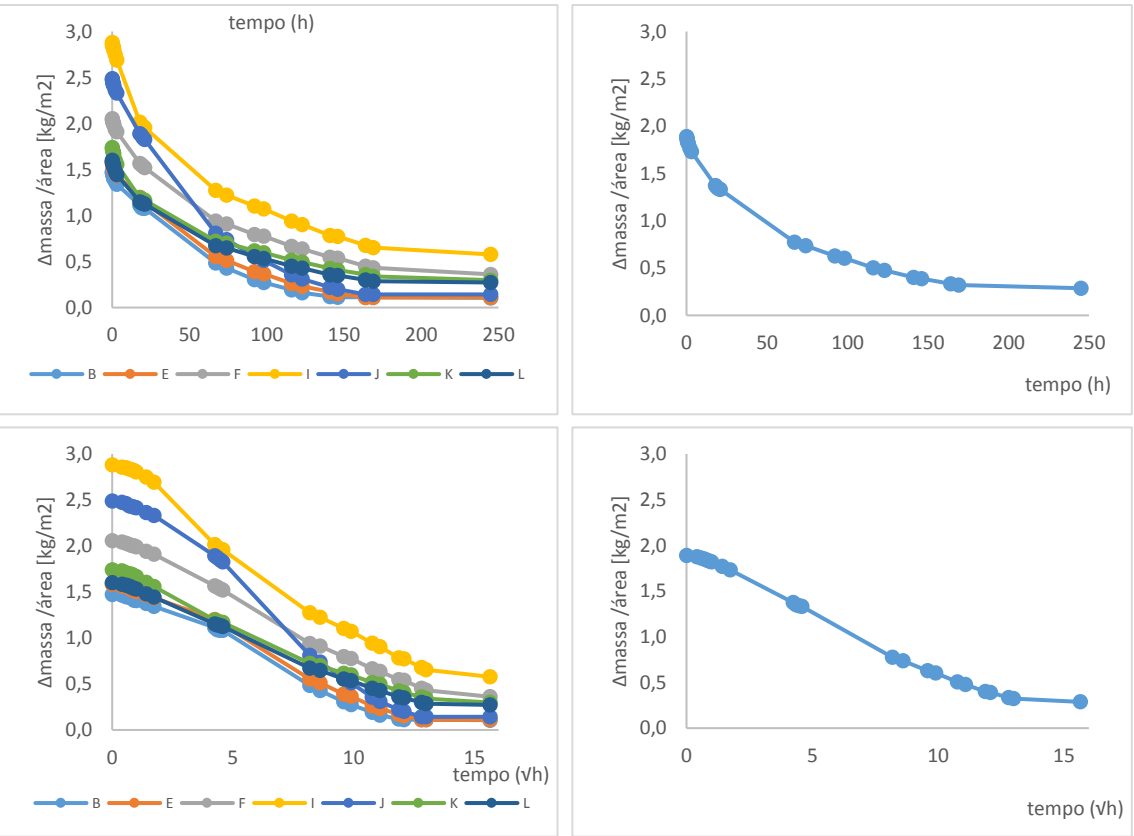


Figura 5.8 - Variação das massas no ensaio de secagem dos provetes consolidados e respetivas médias em função do tempo e da raiz do tempo

A fim de facilitar a leitura, apresenta-se também, na Figura 5.9, o comportamento de cada um dos provetes estudados após o tratamento.

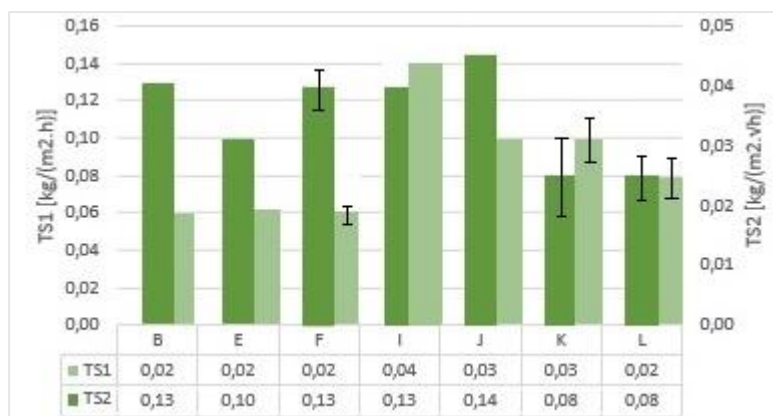


Figura 5.9 - Valores obtidos de TS1 e TS2 das curvas de secagem para os provetes no estado consolidado

Pode-se observar que a variação de massa entre o estado inicial e o consolidado reduz-se bastante, onde o valor médio máximo no estado natural é igual a 14,85 kg/m² e passa a ser 1,89 kg/m² depois de consolidado, traduzindo-se na redução da TS1 de 0,11 kg/(m².h) para 0,03 kg/(m².h) e da TS2 que diminui de 1,56 kg/(m².h¹/²) para 0,11 kg/(m².h¹/²).

A Figura 5.10 apresenta os valores do índice de secagem de cada um dos provetes, antes e depois do processo de consolidação através de um gráfico onde se pode observar que não existe uma tendência bem definida. Os provetes das amostras E, F, J, K e L aumentaram o seu valor de IS de um estado para o outro, no entanto existem os casos dos provetes das amostras B e I em que o IS diminuiu.

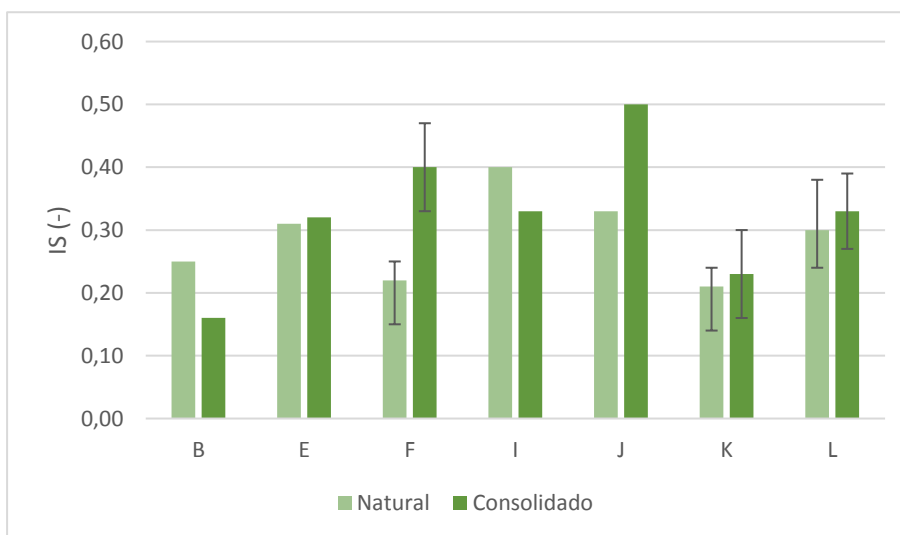


Figura 5.10 - Valores do índice de secagem para os provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)

Na Tabela 5.4 podem observar os valores que foi possível encontrar correspondentes à taxa de secagem (apenas a primeira fase – TS1) e índice de secagem. O trabalho de Colas & Mertz (2012) não consistiu na aplicação de consolidante, mas faz a caracterização de arenitos e o valor obtido

para a primeira fase da curva de secagem é consideravelmente superior ao obtido neste estudo com um valor médio de $0,7 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ para uma porosidade média de 19 %, cerca de metade do que foi obtido para os provetes naturais neste estudo (cerca de 38 %). Em relação aos valores do índice de secagem, é possível constatar que existe um aumento nos resultados encontrados (Tabasso & Santamaria, 1985; Marques, 2008) de 15 % e 20 %, enquanto no presente estudo registou-se um aumento de apenas 10 %, associado, no entanto a desvios-padrão relativamente elevados.

Tabela 5.4 - Resultados de TS1 e IS provenientes da pesquisa bibliográfica e do presente estudo

Referência	Método de aplicação	TS1 [kg/(m ² .h)]		IS (-)	
		Natural	Consolidado	Natural	Consolidado
Tabasso & Santamaria (1985)	Capilaridade	-	-	$\Delta \text{IS} = +15 \%$	
Marques (2008)	Imersão parcial	-	-	$0,1 \pm 0,01$	$0,12 \pm 0,01$
Colas & Mertz (2012)	-	0,7	-	-	-
Presente estudo	Capilaridade	$0,11 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,29 \pm 0,07$	$0,32 \pm 0,11$

Estes resultados permitem relacionar a porosidade aberta com o índice de secagem, na medida em que, quanto maior for a porosidade aparente, menor será o índice de secagem, ou seja, o processo de consolidação faz aumentar o índice de secagem deste material.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram o comportamento das curvas de capilaridade e de secagem para os provetes no estado natural e consolidado. O intervalo compreendido entre as duas retas verticais corresponde ao momento em que os provetes são totalmente imersos, provocando a sua saturação. Verifica-se que, no caso dos provetes sem tratamento, ao fim de apenas uma hora de estarem em contacto com a pequena lâmina de água descrita no ensaio, a sua massa praticamente não altera após serem imergidos, o que significa que praticamente atingem a saturação total. No caso dos provetes consolidados o ensaio de capilaridade tem uma duração muito superior e apenas se atinge uma massa praticamente constante ao fim de cerca de 264 horas. Após serem imersos a variação de massa é superior à do caso anterior, em proporção, porque as quantidades de água absorvidas para os dois casos têm ordens de grandeza muito distintas. Para os provetes sem tratamento a quantidade máxima média absorvida é de $13,42 \text{ kg}/\text{m}^2$ e para os provetes consolidados é de apenas $1,17 \text{ kg}/\text{m}^2$.

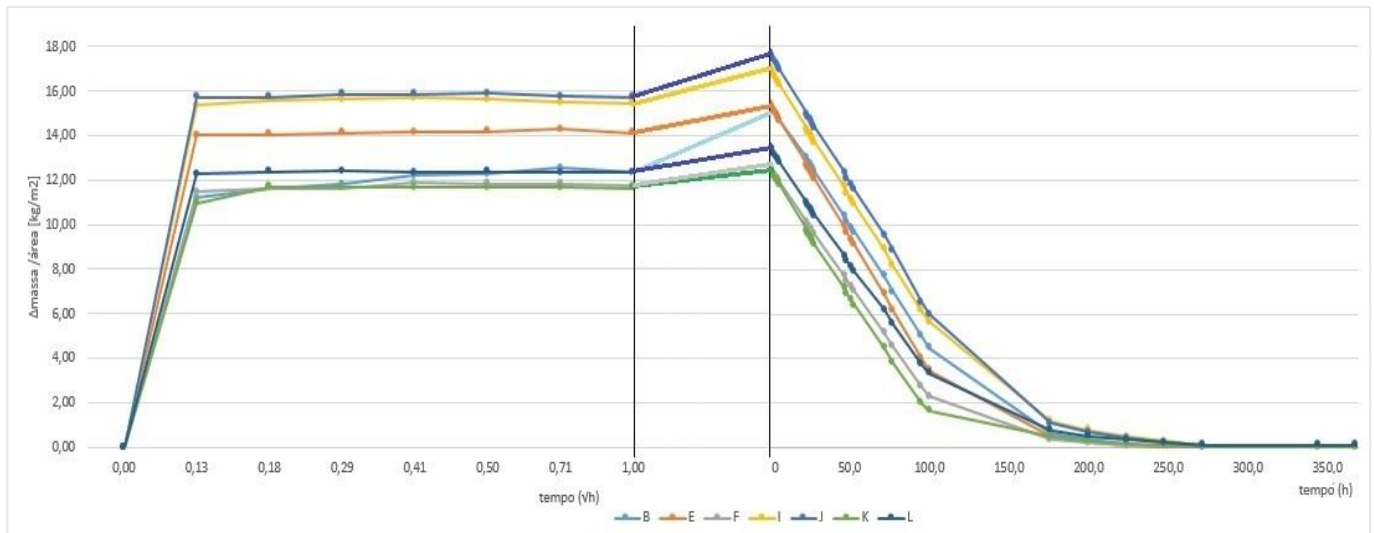


Figura 5.11 - Comportamento das curvas de capilaridade e secagem para os provetes no estado natural (PN)

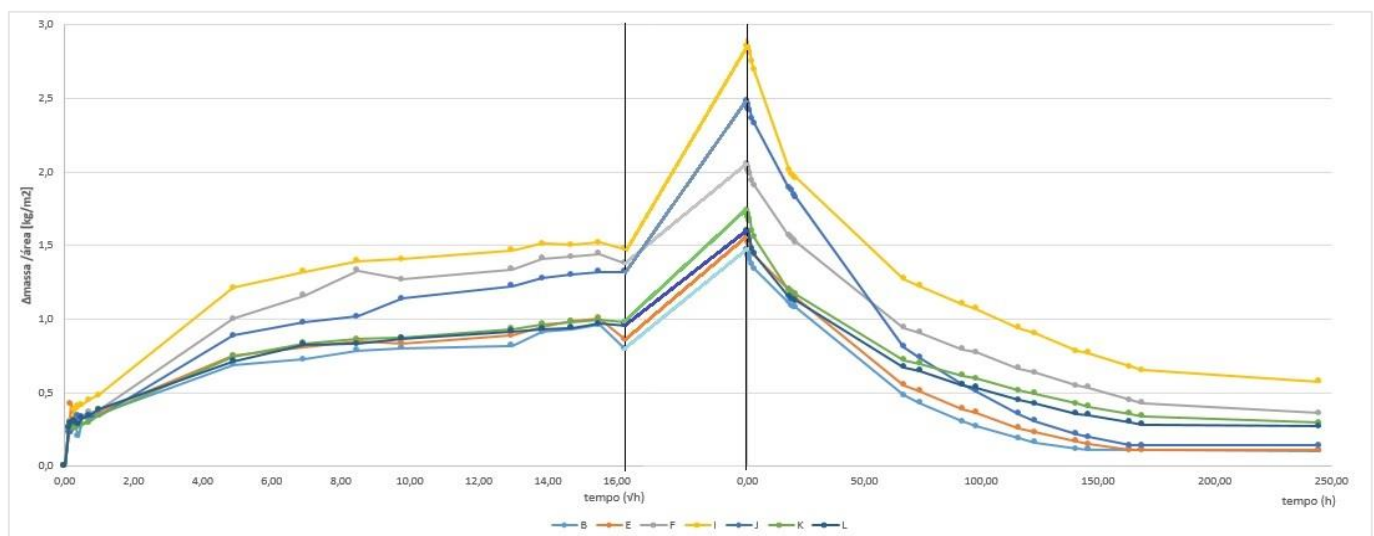


Figura 5.12 - Comportamento das curvas de capilaridade e secagem para os provetes no estado consolidado (PC)

5.2.5 Velocidade de propagação de ondas

O ensaio de determinação da velocidade de propagação de ultrassons é um método indireto e não-destrutivo de avaliação da eficácia de consolidação. Pinto & Rodrigues (2012) sugeriram que este fizesse parte da metodologia normalizada para determinação da profundidade de impregnação do líquido consolidante na pedra uma vez que seria uma boa alternativa ao ensaio de resistência à perfuração.

Os valores médios e respetivos desvios-padrão, obtidos segundo o procedimento descrito no subcapítulo 4.5.2.8 e expressos em km/s, estão representados na Figura 5.13 e mostram um aumento de velocidade entre o estado natural e o consolidado. Como era esperado, comprova-se que o preenchimento dos vazios dos provetes com consolidante provoca um aumento da velocidade de propagação dos ultrassons.

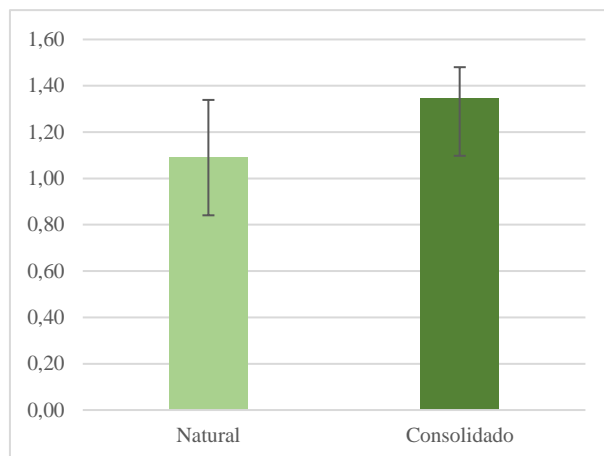


Figura 5.13- Valores médios da velocidade de propagação de ultrassons nos provetes sem tratamento (PN) e consolidados (PC)

A Tabela 5.5 apresenta os resultados encontrados da pesquisa bibliográfica em ensaios que recorrem a consolidantes com base em silicatos. É possível observar que os valores encontrados em Marques (2008) e Pinto & Rodrigues (2008) apresentam velocidades ligeiramente superiores para provetes sem tratamento mas, em relação ao acréscimo de velocidade para os provetes consolidados, os valores são semelhantes. No presente estudo foi obtido um aumento de cerca de 0,21 km/s, enquanto Pinto & Rodrigues (2008) obtiveram 0,32 km/s e Gupta (2011) 0,5 km/s de variação em relação ao estado inicial.

Tabela 5.5 - Resultados de velocidade de ultrassons provenientes de outros autores e do presente estudo

Referência	Método de aplicação	Velocidade de ultrassons [km/s]	
		Natural	Consolidado
Marques (2008)	Imersão parcial	2,20	-
Pinto & Rodrigues (2008)	Imersão parcial	$3,20 \pm 0,10$	$3,52 \pm 0,10$
Gupta (2011)	Capilaridade	$\Delta = 0,50 \text{ km/s}$	
Presente estudo	Capilaridade	$1,14 \pm 0,24$	$1,35 \pm 0,08$

Para se obter uma medição da velocidade de propagação que seja reprodutível, em função das propriedades da pedra submetida a ensaio, é necessário que sejam considerados os diferentes fatores que influenciam a velocidade. A velocidade de ultrassons através da pedra é imputável às condições de humidade, ou seja, a presença de água nos poros influencia a velocidade de propagação, bem como as dimensões dos provetes também influenciam a transmissão de impulsos. A norma aconselha que, para uma frequência de 54 kHz, a menor dimensão lateral seja de 65 mm e que ao utilizar dimensões mais curtas, as velocidades obtidas podem ser reduzidas. Neste ensaio foram utilizados cubos com 5 cm de aresta, não cumprindo aquele requisito, o que poderá ter reduzido os valores obtidos. Por outro lado, o tempo de percurso entre os dois transdutores pode ser mais longo no caso em que haja fissuras ou vazios entre estes, constituindo um obstáculo ao feixe ultrassónico por existir difração nos bordos da anomalia.

5.2.6 Módulo de elasticidade dinâmico

Os resultados do ensaio para determinação do módulo de elasticidade dinâmico foram obtidos antes de se proceder aos ensaios de resistência mecânica e de acordo com o descrito no subcapítulo 4.5.2.1. Foram ensaiados provetes sem qualquer tratamento (no estado natural) e provetes sujeitos a consolidação por capilaridade e por pincelagem. Foram realizadas comparações entre o estado natural e o consolidado por capilaridade das amostras B, C, F, K e L em relação ao módulo de elasticidade dinâmico e conclui-se que o valor mais baixo apresentado corresponde aos provetes da amostra C, por ter uma altura de 10 cm. Os provetes da amostra F são os únicos onde existe uma redução de E_d do estado natural para o consolidado; no entanto este resultado está associado a um elevado desvio padrão, que é explicado por um dos provetes do estado natural ter apresentado valores elevados, podendo ter sido atravessado numa zona mais rígida e com menos poros.

Em relação aos valores obtidos para o tratamento por pincelagem, e tendo sido apenas analisados provetes da amostra L, verificou-se que a variação destes em relação ao estado natural é pequena havendo, porém, um maior desvio-padrão associado nos provetes sem tratamento. Entre os dois métodos de aplicação do consolidante, o processo de imersão por capilaridade garantiu, como era esperado, maiores acréscimos de E_d . No geral verificou-se um aumento nos provetes tratados em relação aos não tratados, como se pode observar pela Figura 5.14.

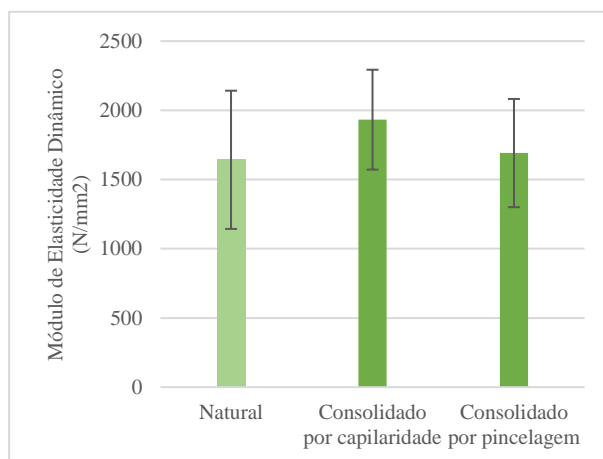


Figura 5.14 - Resultados obtidos de E_d para os provetes sem tratamento, e consolidados por capilaridade e por pincelagem

Segundo Sasse & Snethlage (1996) os valores do módulo de elasticidade dos provetes consolidados só serão aceitáveis até um máximo de 1,5 vezes os dos provetes não alterados, o que é verificado no presente estudo.

Comparando com os valores encontrados na bibliografia (Tabela 5.6), verifica-se que os obtidos tanto para o método por pincelagem como para o método por absorção por capilaridade, constituem um pequeno aumento do estado não-tratado (NT) para o consolidado (T) em relação ao que

é apresentado nos trabalhos de Sassoni et al. (2013) e Graziani et al. (2015). Esta diferença de valores pode ser explicada pela utilização de diferentes equipamentos, pela diferente composição mineral das amostras, pelo tipo de consolidante utilizado ou pelo tempo de secagem.

Tabela 5.6 - Resultados do módulo de elasticidade provenientes da bibliografia e do presente estudo

Referência	Método de aplicação	E _d (MPa)	
		Natural	Consolidado
Sassoni et al., 2013	Pincelagem	2270 ± 160	2840 ± 140
Graziani et al. 2015	Pincelagem	1140	1850
Presente estudo	Pincelagem	1642,5 ± 499,3	1691,3 ± 390,75
	Capilaridade	1762,2	1858,7

5.2.7 Resistência à tração por flexão e resistência à compressão

Os ensaios mecânicos para avaliação da resistência dos provetes foram descritos nos pontos 4.5.2.2 (resistência à tração por flexão) e 4.5.2.3 (resistência à compressão), onde foram ensaiados provetes no estado natural e consolidados por capilaridade e por pincelagem.

A Figura 5.15 mostra a variação de resistências entre os provetes sem e com tratamento por capilaridade. Em quase todos os provetes verificaram-se aumentos consideráveis à exceção do provete consolidado da amostra B, cujo valor de R_t foi ligeiramente inferior ao do provete sem tratamento, o que pode ser explicado pela eventual presença de alguma fissuração no corpo de prova, eventualmente coincidente com a direção de aplicação da força aplicada durante o ensaio. Tratou-se do único caso em que não se verificaram aumentos no ensaio de tração por flexão, tendo apresentado um acréscimo de cerca de 78 % no valor de R_c . Os provetes das restantes amostras apresentam na totalidade valores de R_t com uma média de aproximadamente 50 % de aumento na variação entre o estado inicial e o consolidado.

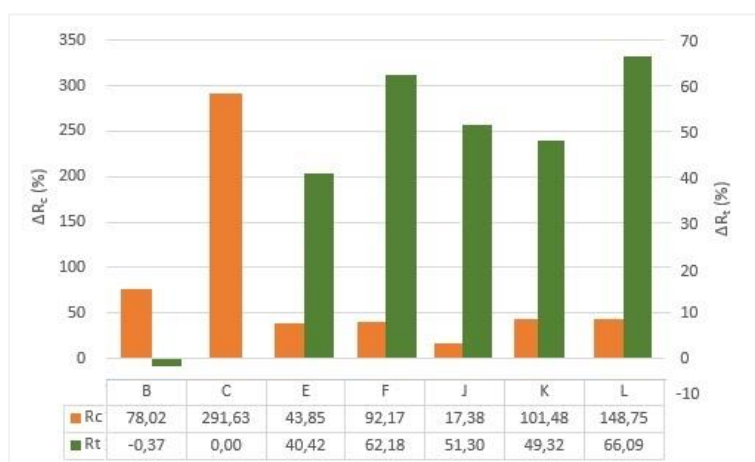


Figura 5.15 - Variação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à tração por flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c)

Em relação aos valores de R_c , observou-se nalguns provetes um aumento de resistência superior a 100 %, como foi o caso dos pertencentes às amostras C, K e L. Apenas os provetes da amostra

J registaram um acréscimo de resistência de cerca de 17 %. Por outro lado, o provete da amostra C (mais pequeno em comprimento, daí não ter registo de R_t) acusou, depois de aplicado o tratamento de consolidação, um aumento de quase 300 % no ensaio de compressão.

Quanto aos provetes consolidados através do processo de pincelagem, é possível observar pela Figura 5.16 que R_t apresenta exatamente os mesmos valores; no entanto, o desvio-padrão associado ao processo por pincelagem é o dobro do valor de desvio-padrão dos provetes tratados por capilaridade, que resulta de um provete (L_PCB3) apresentar valores muito superiores aos restantes. Comparativamente aos valores de R_c , é evidente que o processo de capilaridade apresenta valores muito mais elevados. Em relação ao estado natural, ambos os processos apresentam valores superiores. Em relação aos dois tipos de aplicação, o método de absorção por capilaridade apresenta valores superiores em relação à aplicação por pincelagem.

Em média, para os valores de R_t , a aplicação por absorção por capilaridade induziu um aumento de cerca de 45% enquanto que, aplicando por pincelagem, o aumento foi superior: cerca de 65 %. Em relação a R_c , invertem-se as tendências: por pincel apenas surtiu um aumento de 30 %, enquanto que por capilaridade a variação entre os dois estados atingiu cerca de 110 %.

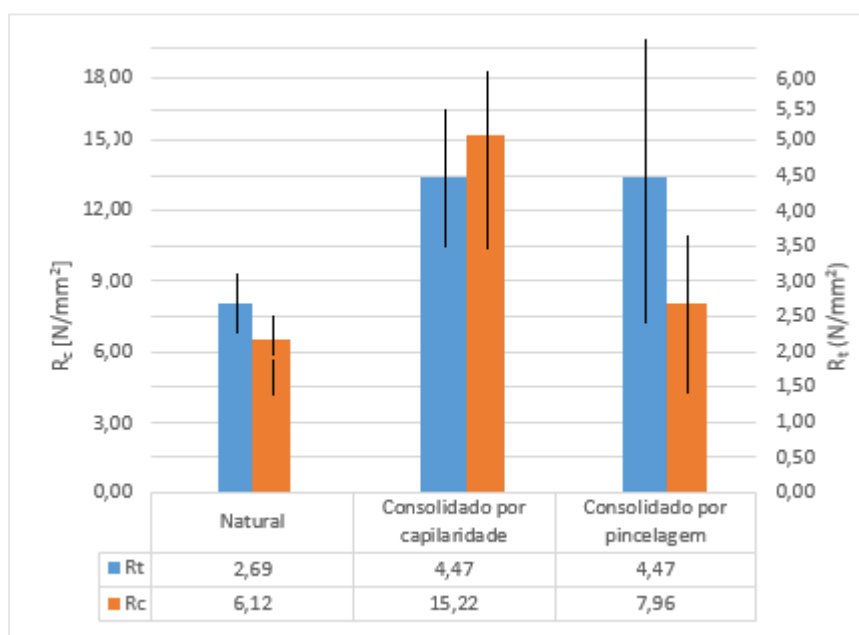


Figura 5.16 Variação das resistências à tração por flexão (R_t) e resistência à compressão (R_c) antes e após o processo de consolidação

Os resultados encontrados da pesquisa bibliográfica para o método de aplicação por capilaridade e uma variante semelhante (aplicação por imersão total ou parcial) são descritos na Tabela 5.7 e para o método de aplicação por pincelagem na Tabela 5.8. Face aos resultados da primeira tabela, todos os valores indicam a mesma tendência de aumento, seja de R_t como de R_c , após o tratamento com consolidante. Para os valores de R_t , obteve-se no presente estudo um aumento de cerca de 45 % de resistência dos provetes sem tratamento (PN) para os provetes consolidados (PC),

enquanto Marques (2008) registou um aumento inferior, apesar de ter obtido resistências mecânicas muito superiores às do arenito estudado nesta dissertação. Por outro lado, observaram-se casos em que os aumentos de resistências foram superiores a 100 % (Zinsmeister et al. 1988; Pinto & Rodrigues 2008).

Para os valores de resistência à compressão, as ordens de grandeza dos valores encontrados são muito superiores às do presente estudo; no entanto foi obtido um aumento médio de resistência de cerca de 100 % nos provetes consolidados. Tiano et al. (2000) obteve valores elevados de resistências em dois arenitos mas apenas com cerca de 30 % de variação registada entre os provetes não-tratados e o estado consolidado.

Tabela 5.7 - Resultados obtidos de resistências mecânicas (compressão e tração por flexão) por outros autores através do método de aplicação por capilaridade, imersão total ou parcial e pelo presente estudo.

Referência	Método	R _t [N/mm ²]		R _c [N/mm ²]	
		Natural	Consolidado	Natural	Consolidado
Zinsmeister et al. (1988)	Imersão	3,03	7,32	16,80	31
Tiano et al. (2000)	Capilaridade			52,30 ± 11	71,50 ± 12
				83,60 ± 18,70	101,6 ± 17,60
Marques (2008)	Imersão parcial	57,50	72,20	30,90	48,10
Rodrigues (2008)	Imersão	5,20	10,60		
Presente estudo	Capilaridade	2,34 ± 0,72	3,36 ± 1,14	4,63 ± 2,16	9,16 ± 4,75

Para o método de aplicação por pincelagem (ver Tabela 5.8) os valores da pesquisa bibliográfica estão mais próximos da gama de valores de R_t e R_c obtidos. Em relação aos valores de R_t, e de forma análoga ao anterior, este estudo tem a maior percentagem de variação quando comparado com os restantes estudos (Watsantachad, 2001; Sassoni et al., 2013) aumentando cerca de 65 % o valor de resistência. Em termos de compressão, apenas se registaram incrementos de cerca de 30 % com este método, inferior aos resultados obtidos por Saleh et al., (1992) e Watsantachad, (2001).

Tabela 5.8 - Resultados obtidos de resistências mecânicas (compressão e tração por flexão) por outros autores através do método de aplicação por pincelagem e pelo presente estudo.

Referência	Método	R _t [N/mm ²]		R _c [N/mm ²]	
		Natural	Consolidado	Natural	Consolidado
Saleh et al. (1992)	Pincelagem	-	-	9,80	15,70
Watsantachad (2001)	Pincelagem	7,95-8,63	10,73-12,00	13,90-15,90	27-27,30
Sassoni et al. (2013)	Pincelagem	4,10 ± 0,90	5,40 ± 1,20	-	-
Presente estudo	Pincelagem	2,69 ± 0,55	4,47 ± 2,04	6,12 ± 1,62	7,96 ± 3,58

Pode-se afirmar que através do método de aplicação de consolidante por capilaridade se atingiram valores mais elevados de resistências. Este facto deve-se ao tempo mais prolongado de contacto

entre o produto e os provetes, existindo uma maior taxa de absorção em relação à aplicação com pincel.

Capítulo 6 - Conclusões

6.1 Considerações iniciais

Neste capítulo sintetiza-se de forma global o trabalho desenvolvido na presente dissertação e apresentam-se as respetivas conclusões baseadas na análise e discussão dos resultados obtidos na campanha experimental.

6.2 Conclusões

O edificado patrimonial do Forte da Praia do Pessegueiro representa uma pequena percentagem de monumentos construídos em arenito e o estudo do seu comportamento físico e mecânico ainda está pouco desenvolvido em Portugal. Com pouco mais de três séculos de existência, e em virtude da sua proximidade ao mar, a presença constante de sais tem afetado o seu estado de conservação desde o início da sua construção. O presente estudo através da investigação experimental realizada, procurou contribuir para o conhecimento mais aprofundado destas características. O seu estado de degradação e possibilidade de reforço foram analisados em laboratório após a submissão dos provetes a ensaios físicos e mecânicos, no estado natural e consolidado.

Por forma a não comprometer a integridade do monumento, houve necessidade de se recorrer a amostras soltas que representassem de forma semelhante aquele material utilizado para a sua construção, tendo estas sido recolhidas em troços derrubados da muralha exterior do forte. Isto permitiu desenvolver uma investigação experimental das características físicas e mecânicas do arenito. Cada amostra foi dividida por serragem em dois blocos, de onde se talharam provetes prismáticos e cilíndricos, metade dos quais foi ensaiada no estado natural (sem tratamento) e a outra metade foi ensaiada após a aplicação de um produto consolidante comercial, à base de silicato de etilo (Tegovakon® – TG)

O processo de aplicação do produto consolidante foi executado tendo por base os resultados de estudos encontrados na pesquisa bibliográfica sobre arenitos. O produto utilizado foi aplicado por um processo de absorção por capilaridade aos provetes PC. Para além deste método foram ainda consolidados três provetes, denominados de PCB, através de pincelagem para comparação de resultados entre os dois tipos de procedimentos. Os provetes no estado natural, sem qualquer tratamento aplicado, designam-se por PN.

Dos provetes PN e PC foram obtidos e comparados os valores das propriedades intrínsecas do material (porosidade aberta, massas volúmicas, teor de absorção de água) e realizados ensaios de permeabilidade ao vapor de água, absorção de água por capilaridade e respetiva secagem e ensaio

de velocidade de ultrassons. Em relação aos ensaios mecânicos, foram realizados sobre os provetes já mencionados e também sobre os provetes PCB (consolidados por pincelagem).

O estudo das porosidades abertas permitiu constatar uma redução de cerca de 26 % nos provetes tratados com TG, de cerca de 38 % para 30 %.

No ensaio de permeabilidade ao vapor de água, o único em que são ensaiados os provetes cilíndricos, ou discoides, também ocorre o efeito consolidante. Verificou-se uma redução de cerca de 30 % entre a massa perdida por evaporação dos provetes consolidados e os provetes sem tratamento. Conclui-se assim que o tratamento consolidante reduziu a permeabilidade ao vapor em cerca de 28 %.

Ainda sobre o comportamento do arenito face à presença de água, nos ensaios de absorção de água por capilaridade e respetiva secagem, atesta-se a ação do consolidante ao reduzir o coeficiente de absorção capilar de um valor médio de $13,0 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$ para $0,16 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{1/2})$, justificando os baixos valores de coeficientes de absorção capilar obtidos no caso tratado. Após o término do ensaio de capilaridade, e depois de realizada a saturação dos provetes por imersão total, verificou-se que nos provetes não tratados houve um acréscimo de quantidade de água absorvida de cerca de 11 % de $13,42 \text{ kg}/\text{m}^2$ para $14,86 \text{ kg}/\text{m}^2$. Este facto permite concluir que, através do processo de capilaridade, quase se atingiu a saturação total dos provetes sem tratamento, enquanto os provetes consolidados registaram um aumento médio de cerca de 1,11 kg/m^2 para 1,89 kg/m^2 correspondendo a um aumento de cerca de 70% após saturação.

Segundo Saleh et al., (1992) este tipo de composto aplicado nos provetes reduz a absorção de água para valores muito baixos, o que resulta das suas características hidrorrepelentes, derivado da presença dos grupos alquil ligados a átomos de sílica que, estando presentes na superfície externa dos polímeros constituintes do produto consolidante, repelem as moléculas de água. No entanto, foi possível observar que o comportamento das curvas de capilaridade, em alguns instantes, registavam valores de quantidade de água absorvida inferiores à medição anterior. Pode-se concluir que a ação do consolidante dificulta a absorção de água para o interior dos provetes em relação à libertação desta para o exterior.

Quando avaliados os parâmetros mecânicos (resistências à rotura em compressão e em tração por flexão e módulo de elasticidade dinâmico) foi tida em conta a eficácia do TG aplicado por capilaridade e pincelagem. Em termos de variações, o processo de aplicação por capilaridade apresentou melhores resultados do que por pincelagem. Verificaram-se incrementos de resistência à compressão uniaxial de cerca de 110 % por capilaridade e de cerca de 30 % por pincelagem. Para a resistência à tração por flexão, a tendência inverte-se: cerca de 45% de aumento no caso da aplicação por capilaridade e cerca de 65 % por pincelagem; no entanto a este último método está associado o dobro do valor de desvio-padrão relativamente ao anterior. Os valores do módulo

de elasticidade dinâmico registaram um aumento de cerca de 12 % quando consolidados por capilaridade e apenas cerca de 2 % por pincelagem.

A impregnação do consolidante nos provetes também foi verificada, através do incremento de velocidade de atravessamento por ultrassons que aquele proporcionou. Registou-se um aumento de cerca de 16 % nos provetes consolidados em relação aos provetes não tratados.

A aplicação de TG conferiu aos provetes uma maior coesão entre as partículas, preenchendo os espaços vazios, aumentando a sua massa. A taxa de ganho de massa para os provetes consolidados por capilaridade foi de cerca de 8 % e por pincelagem de cerca de 4 %, o que permite concluir que a absorção de líquido consolidante é mais eficaz quando consolidado por capilaridade devido aos provetes estarem em contacto com maiores quantidades de líquido durante um período de tempo superior.

No geral, a aplicação do consolidante resultou na melhoria da coesão do material pétreo em relação ao seu estado sem tratamento e revelou resultados muito positivos em termos físicos e mecânicos. Em termos mecânicos conclui-se que existe um aumento geral das características mecânicas e em termos físicos, o produto consolidante, para além de dificultar a penetração da água devido à diminuição do volume dos poros e, com ela a introdução de sais e outros compostos agressivos, permite também a saída da água sob a forma de vapor, não ficando esta concentrada no interior da pedra.

6.3 Proposta para desenvolvimentos futuros

Uma das principais componentes da presente campanha experimental consistiu na aplicação de um produto consolidante para avaliação do seu efeito num tipo muito específico de rochas; no entanto a quantidade de variáveis que influenciam um tratamento com este tipo de produto é enorme e muitos fatores não foram tidos em conta.

Sugere-se que seja aumentado a quantidade de produtos consolidantes a aplicar para se poder comparar os seus efeitos, bem como a adição de produtos orgânicos/inorgânicos como melhoramento das características do composto silicatado. Será importante ter em conta diferentes métodos de aplicação e ter em conta parâmetros fundamentais durante o processo como os tempos de cura. Não está definido o tempo de cura ideal do composto para se obter os melhores resultados; no entanto, Sasse & Snethlage (1996) consideram que este tempo não deve ser prolongado. Outros autores defendem que deve rondar um mês (Pinto & Rodrigues 2011; Clercq et al., 2007) que corresponde aos tempos de cura indicados em fichas técnicas de alguns produtos. Por isto, e por se ter utilizado um tempo de cura muito inferior, os resultados podem não ter sido maximizados.

A localização geográfica do Forte da Praia do Pessegueiro pressupõe um estudo sobre a influência dos principais sais na degradação física e mecânica causada pela sua cristalização. Sugere-se a realização de uma análise química para identificar os principais sais presentes, bem como um estudo de influência do nevoeiro salino e envelhecimento artificial por cristalização salina.

Ainda sobre ensaios para avaliar o efeito da consolidação considera-se que a análise da porometria para avaliar a influência do produto no interior dos poros e a resistência à profundidade de furação para análise da penetrabilidade deste no interior dos provetes revelariam informações mais detalhadas sobre a atuação e eficácia deste tipo de produtos no tratamento de pedras naturais.

Finalmente, seria pertinente avaliar as condições de degradação que resultaram de cerca de 300 anos de existência e a única forma de o conseguir seria através da recolha de “pedra-virgem”, proveniente da pedreira contígua ao forte ou, caso esta seja objeto de preservação, de outros locais próximos onde o eolianito do litoral alentejano ocorra. Neste caso, seria recomendável utilizar amostras retiradas de maciço *in situ*, de preferência de zonas não superficiais, afastadas o mais possível da influência dos agentes da Geodinâmica Externa, principalmente, não acessíveis à penetração de compostos químicos exteriores, tanto naturais (NaCl marítimo, por exemplo), como de origem antrópica (nitratos e sulfatos provenientes lançados pelas atividades humanas).

Referências Bibliográficas

- Aguzzi, F.A. et al., 1973. L'arenaria della Basilica di S. Michele in Pavia. Ricerche sull'alterazione e sugli effetti dei trattamenti conservativi. *Atti Società Italiana di Scienze Naturali*, 144(4), pp.403–64.
- Aires-Barros, L., 2001. As rochas dos monumentos portugueses: tipologias e patologias. Vol. 1 e 2 I. P. do P. Arquitetónico, ed.,
- Amadei, B., 1996. Importance of anisotropy when estimating and measuring in situ stresses in rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics*, 33(3), pp.293–325.
- Appleton, J., 2012. Projeto de Consolidação e Reforço de Estruturas de Alvenarias: as Técnicas e a Ética. Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, pp.149–154.
- Ariño, X. et al., 1995. Lichen colonization of the Roman pavement at Baelo Claudia (Cadiz, Spain): biodeterioration vs. bioprotection. *Science of the Total Environment*, 167(1–3), pp.353–363.
- Ascaso, C., Wierzechos, J. & Castello, R., 1998. Study of the biogenic weathering of calcareous litharenite stones caused by lichen and endolithic microorganisms. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 42(1), pp.29–38.
- Aydin, A., 2009. ISRM Suggested method for determination of the Schmidt hammer rebound hardness: Revised version. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), pp.627–634.
- Bell, F.G., 1978. The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. *Engineering Geology*, 12, pp.1–29.
- Bosch, E., 1973. Use of silicones in conservation of monuments. First International Symposium on the Deterioration of Buildings Stones, 11–16, pp.21–26.
- Brunsdon, D. & Prior, D.B., 1984. Ground Investigation, sampling and testing for studies of slope instability. *Slope Instability*, Cap. 3, pp.67–101.
- Carvalho, A.M.G. & Romariz, C., 1973. Dunas consolidadas da região de Sines-Porto Covo - excerto. , pp.109–112.
- CEN, NP EN ISO 12572: Hygrothermal performance of building materials and products; Determination of water vapour transmission properties; Cup method. 2016 102

- CEN, EN 16302: Conservation of cultural heritage. Test methods; Measurement of water absorption by pipe method. 2013
- CEN, EN 16322: Conservation of cultural heritage; Teste methods; Determination of drying properties. 2013
- Charola, A.E., 1987. Acid rain effects on stone monuments. *Journal of Chemical Education*, 64(5), p.436.
- Charola, A.E., 2000. Salts in the Deterioration of Porous Materials: An Overview. *Journal of the American Institute for Conservation*, 39(3), p.327.
- Charola, A.E., Wheeler, G.S. & Freund, G.G., 1984. The influence of relative humidity in the polymerization of methyltrimethoxysilane. London. *Adhesives and Consolidants, IIC*, pp.177–181.
- Clercq, H. De et al., 2007. TEOS and Time: influence of application schedules on the effectiveness of ethyl silicate based consolidants. *Restoration of buildings and monuments*, 13(5), pp.399–408.
- Colas, E. & Mertz, J.-D., 2012. Influence of salt solution nature on the drying of clayey sandstone. 12th Int. Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Columbia University, New York, p.9.
- Costa, D. & Rodrigues, J.D., 2012. Consolidation of a porous limestone with nanolime. 12th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, New York, p.10.
- Danin, A., Weathering of limestone in Jerusalem by cyanobacteria. *Z. Geomorph. N. F. Berlin*, pp.413–421.
- David, C., Menéndez, B. & Bernabé, Y., 1998. The mechanical behaviour of synthetic sandstone with varying brittle cement content. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(6), pp.759–770.
- Deere, D.U. & Miller, R.P., 1966. Engineering Classification and Index Properties for Intact Rock. Air Force Weapons Laboratory Technical Report. Air Force Weapons Lab., New Mexico, No., AFNL-TR. Kirtland. AFWL, pp.65–116.
- DGEMN, 1986. Direção-Geral dos Monumentos e Edifícios Nacionais: Forte de Porto Covo ou do Pessegueiro. Processo Geral,
- Dionísio, A., 2002. Degradação da pedra em edifícios históricos: o caso da Sé de Lisboa. Tese de Doutoramento. Universidade Técnica de Lisboa. , p.347 p.

- Domaslowski, W. & Lukaszewicz, J.W., 1988. Possibilities of silica application in consolidation of stone monuments. 6th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: Proceedings, Torun, 12-14 September 1998, Torun. Nicholas Copernicus University Press; 1998. p. 563–76.
- Dragovich, D., 1993. Distribution and chemical composition of microcolonial fungi and rock coatings from arid Australia. *Physical Geography*, 14(4), pp.323–341.
- Edwards, H.G.M. et al., 2002. Raman spectroscopic study of lichen-assisted weathering of sandstone outcrops in the High Atlas Mountains, Morocco. *Journal of Raman Spectroscopy*, 33(6), pp.449–454.
- Freitas, M.H. De & Dobereiner, L., 1986. Geotechnical properties of weak sandstones. *Géotechnique*, 36(1), pp.79–94.
- Goins, E.S., 1995. Alkoxysilane stone consolidants. The effect of the stone substrate on the polymerization process. Tese de Doutorado, University College London, University of London.
- Graziani, G., Sassoni, E. & Franzoni, E., 2015. Consolidation of porous carbonate stones by an innovative phosphate treatment: Mechanical strengthening and physical-microstructural compatibility in comparison with TEOS-based treatments. *Heritage Science*, 3(1), pp.9–11.
- Gunsallus, K.L. & Kulhawy, F.H., 1984. A comparative evaluation of rock strength measures. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* and, 21(5), pp.233–248.
- Gupta, S.P., 2011. Conservation of Stone Structure by Impregnation with Tetraethoxysilane. *International Journal of Chemical and Analytical*, 2(8), pp.115–119.
- Gutmann, K. et al., 2014. Europe's Dirty 30. CAN Europe, WWF, HEAL, EEB and Climate Alliance Germany in Brussels, Belgium.
- Henriques, F., 1994. *Humidade em Paredes*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa 3ª Ed. 200.
- Henriques, F.M.A., 2005. *Materiais pétreos e similares : terminologia das formas de alteração e degradação 2ª edição.*, LNEC.
- Hugman, R.H.H. & Friedman, M., 1979. Effects of Texture and Composition on Mechanical Behavior of Experimentally Deformed Carbonate Rocks. *American Association of Petroleum Geologists (AAPG) Bulletin*, 63(9), pp.1478–1489.
- ICOMOS, 1931. The Athens Charter for the Restoration of Historic Monuments. 1st International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, p.5.

- ICOMOS, 2000. The Charter of Krakow 2000: principles for conservation and restoration of built heritage. *Archaeologia Polona*, 38, p.5.
- ICOMOS, 1964. The Venice Charter 1964. 2nd International Congress of Architects and Technicians of Historic Monuments, pp.1–4.
- ICOMOS & ISCS, 2008. Illustrated glossary on stone deterioration patterns Vergès-Bel., Champigny/Marne, France.
- IPQ, NP EN 1925: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade. 2000 104
- IPQ, NP EN 1926: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação da resistência à compressão uniaxial. 2008
- IPQ, NP EN 1936: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação das massas volumicas real e aparente e das porosidades total e aberta. 2008
- IPQ, NP EN 12372: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação da resistência à flexão sob carga centrada. 2008
- IPQ, NP EN 14146: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação do módulo de elasticidade dinâmico (através da medição da frequência de ressonância fundamental). 2006
- IPQ, NP EN 14579: Métodos de ensaio para pedra natural; Determinação da velocidade de propagação do som. 2007
- Jeng, F.S. et al., 2004. Influence of petrographic parameters on geotechnical properties of tertiary sandstones from Taiwan. *Engineering Geology*, 73(1–2), pp.71–91.
- Katz, O., Reches, Z. & Roegiers, J.-C., 2000. Evaluation of mechanical rock properties using a Schmidt. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, pp.723–730.
- Kumar, R. & Ginell, W.S., 1995. Evaluation of consolidants for stabilization of weak Maya limestone. Methods of evaluating products for the conservation of porous building materials in monuments: international colloquium, Rome, 19-21 June 1995: preprints, pp.19–21.
- Laboratório Nacional de Engenharia Geológica, 2018. Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas.
- Laurenzi Tabasso, M. & Santamaria, U., 1985a. Consolidant and protective effects of different products on lecce limestone. Ve Congres international sur l’alteration et la conservation de la pierre: actes, pp.697–707.

- Laurenzi Tabasso, M. & Santamaria, U., 1985b. Consolidant and protective effects of different products on Lecce limestone. In Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Lausanne, Presses Polytechniques Romandes. pp. 697–707.
- Laurie, A.P., 1926. Preservation of stone. U.S. Patent Application.
- Lewin, S.Z., 1966. The perservation of stone. U.S. Patent Application, 529, p.213.
- Ling, H., Maiqian, N. & Guozheng, L., 2008. Preparation and feasibility analysis of fluoropolymer to the sandstone protection. Progress in Organic Coatings, 62(2), pp.206–213.
- Ludovico-Marques, M. & Chastre, C., 2014. Effect of consolidation treatments on mechanical behaviour of sandstone. Construction and Building Materials, 70, pp.473–482.
- Luo, Y., Xiao, L. & Zhang, X., 2015. Characterization of TEOS/PDMS/HA nanocomposites for application as consolidant/hydrophobic products on sandstones. Journal of Cultural Heritage, 16(4), pp.470–478.
- Marques, M.A.L., 2008. Contribuição para o conhecimento do efeito de cristalização de sais na alterabilidade de arenitos. Tese de Doutoramento. FCT/UNL, p.314.
- Marques, M.L., Chastre, C. & Vasconcelos, G., 2012. Modelling the compressive mechanical behaviour of granite and sandstone historical building stones. Construction and Building Materials, 28(1), pp.372–381.
- Matteini, M., 2008. Inorganic treatments for the consolidation and protection of stone artefacts and mural paintings. Conservation Science in Cultural Heritage, 8, pp.13–27.
- Medici, T., Angelucci, D.E. & Pereira, A.R., 2007. Da areia à farinha: primeiras informações sobre a utilização de eolianito quaternário para extracção e produção de mós. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Vol. 5, APGeom, Lisboa, 5, pp.179–189.
- Mosquera, M.J. et al., 2009. New Nanomaterials for Protecting and Consolidating Stone. Journal of Nano Research, 8(September), pp.1–12.
- Moussa, A.B., Ouacha, H. & Simao, J., 2013. The salt crystallization weathering of building rocks of the archaeological sites calcarenites of north-western Morocco. European Scientific Journal, 9(18), pp.282–290.
- O' Rourke, J.E., 1989. Rock index properties for geoengineering underground development. Minerals Engineering, pp.106–110.

- Pereira, A.N.A.R., 1985. Dunas Consolidadas em Portugal - Análise da bibliografia e algumas reflexões. Relatório nº 22. Centro de Estudos Geográficos I.N.I.C. Lisboa.
- Pereira, A.R., 1987. Acumulações arenosas eólicas consolidadas do litoral do Alentejo e Algarve Ocidental. Relatório nº 27. Centro de Estudos Geográficos. I.N.I.C. Lisboa, p.113.
- Pinto, A.P.F. & Rodrigues, J.D., 2012. Consolidation of carbonate stones: Influence of treatment procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 13(2), pp.154–166.
- Pinto, A.P.F. & Rodrigues, J.D., 2011. Consolidation of carbonate stones: Influence of treatments procedures on the strengthening action of consolidants. *Journal of Cultural Heritage*, 13, pp.154–166.
- Pinto, A.P.F. & Rodrigues, J.D., 2008. Stone consolidation: The role of treatment procedures. *Journal of Cultural Heritage*, 9(1), pp.38–53.
- Plenderleith, H.J. & Werner, A.E.A., 1971. *The Conservation of Antiquities and Work of Art* Oxford University, ed.,
- Quaresma, A.M., 2009. Fortificação da Costa de Sines após a Restauração. Forte do Pessegueiro. Ed. 1 Sines: Museu de Sines, 2009. 108p.
- Rodrigues, J.D., Pinto, A.F. & Costa, D.R., 2002. Tracing of decay profiles and evaluation of stone treatments by means of microdrilling techniques. *Journal of Cultural Heritage*, 3(2), pp.117–125.
- Rossi-Manaresi, R., 1981. Effectiveness of conservation treatments for the sandstone of monuments in Bologna. The conservation of Stone, II: preprints of the contributions to the international symposium, Bologna, 27-30 October 1981 - Part A: deterioration, Part B: treatment.
- Ruiz, V.G. & Su, L.M., 2006. Consolidants influence on the Sandstone capillarity study, 6p.
- Ruiz de Argandoña, V.G. et al., 2009. X-ray Computed Tomography study of the influence of consolidants on the hydric properties of sandstones for stone conservation studies. *Engineering Geology*, 103(3–4), pp.69–75.
- Saleh, A.S. et al., 1992. Study and Consolidation of Sandstone : Temple of Karnak , Luxor , Egypt. *Studies in Conservation*, 37(2), pp.93–104.
- Saptono, S., Kramadibrata, S. & Sulistianto, B., 2013. Using the Schmidt Hammer on Rock Mass Characteristic in Sedimentary Rock at Tutupan Coal Mine. *Procedia Earth and Planetary Science*, 6, pp.390–395.

- Sasse, H.R. & Snethlage, R., 1996. Evaluation of stone consolidation treatments. *Science and Technology for Cultural Heritage, Journal of the “Comitato Nazionale per la Scienza e la Tecnologia dei Beni Culturali”*, CNR. 5(I), pp.85–92.
- Sassoni, E. et al., 2013. Consolidation of calcareous and siliceous sandstones by hydroxyapatite: Comparison with a TEOS-based consolidant. *Journal of Cultural Heritage*, 14(3), pp.103–108.
- Selwitz, C., 1992. *Research in Conservation. Epoxy Resins in Stone Conservation I*. Averkieff, ed., J. Paul Getty Trust.
- Shore, B.C.G., 1957. *Stones of Britain*, London, Leonard Hill Books.
- Siedel, H., Plehwe-Leisen, E. V. & Leisen, H., 2008. Salt load and deterioration of sandstone at the Temple of Angkor Wat, Cambodia. 11th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Torun, Poland, pp.267–274.
- Siegesmund, S. & Dürrast, H., 2011. Physical and Mechanical Properties of Rocks. *Stone in Architecture*, 3(2), pp.97–225.
- Singh, R.N., Hassani, F.P. & Elkington, P.A.S., 1983. The application of strength and deformation index testing to the stability assessment of coal measures excavations. *Proc. 24th US Symp. On Rock Mech.*, Texas A&M Univ., pp.599–609.
- Smart, B.G.D., Rowlands, N. & Isaac, A.K., 1982. Progress towards establishing relationships between the mineralogy and physical properties of coal measures rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and*, 19(2), pp.81–89.
- Snethlage, R. & Klemm, D., 1978. Scanning electron microscope investigation on impregnated sandstones. Preprints for the International Symposium: Deterioration and Protection of Sandstone Monuments. Paris: RILEM e UNESCO, 2.
- Steiger, M., Charola, A.E. & Sterflinger, K., 2014. Weathering and deterioration. In *Stone in Architecture: Properties, Durability: Fifth Edition*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, pp. 225–316.
- Tiano, P. et al., 2000. The conservation of monuments: a new method to evaluate consolidating treatments. *Restoration of Buildings and Monuments*, 6(2), pp.133–150.
- Traska, M., 2014. Water transport properties in building materials : traditional methods versus CT-based pore network analysis. Tese de Mestrado. Universiteit Gent.

- Viles, H., 1987. A quantitative scanning electron microscope study of evidence for lichen weathering of limestone, Mendip Hills, Somerset. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12(5), pp.467–473.
- Vutukuri, V.S., Lama, R.D. & Saluja, S.S., 1974. Handbook on mechanical properties of rocks: testing techniques and results, Trans Tech Publications.
- Watsantachad, N., 2001. An investigation of sandstone consolidation method for the northern Gopura of the Phimai sanctuary, a khmer monument in Thailand. Tese de Mestrado. University of Pennsylvania.
- Weber, H., 1976. Stone renovation and consolidation using silicones and silic esters. *The Conservation of Stone I*, pp.375–85.
- Wells, M.K., 1983. Petrography: An introduction to the study of rocks in thin sections. *Mineral. Mag.*, 47(345), pp.569–570.
- Wheeler, G., 2005. Alkoxysilanes and the Consolidation of Stone,
- Wheeler, G.S., Fleming, S.A. & Ebersole, S., 1992. Comparative strengthening effect of several consolidants on Wallace sandstone and Indiana limestone. In *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone: held in Lisbon, Portugal, 15-18 June 1992*. pp. 1033–1041.
- Williams, R.B.G. & Robinson, D.A., 2001. Experimental frost weathering of sandstone by various combinations of salts. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26(8), pp.811–818.
- De Witte, E., Charola, A.E. & Sherryl, R.P., 1985. Preliminary tests on commercial stone consolidants. In *Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Lausanne*. pp. 709–718.
- Zárraga, R. et al., 2010. Effect of the addition of hydroxyl-terminated polydimethylsiloxane to TEOS-based stone protective materials. *Journal of Cultural Heritage*, 11, pp.138–144.
- Zinsmeister, K.J.H., Weiss, N.R. & Gale, F.R., 1988. Laboratory evaluation of consolidation treatment of Massillon (Ohio) sandstone. *APT bulletin*, 20(3), pp.35–39.

Anexos

ANEXO I

A.1 Massa volúmica e porosidade aberta

- **Provetes sem consolidação (PN)**

Tabela A.1 – Resultados individuais de massa volúmica aparente, porosidade aberta e teor máximo em água para os provetes sem tratamento (PN)

Provete	Massa seca (m _a) [g]	Massa hidros-tática (m _h) [g]	Massa satu-rada (m _s) [g]	Massa volúmica aparente (Mv _{ap}) ⁽¹⁾ (kg/m3)						Porosidade aberta (P _{ab}) [%]				Teor máximo em água (w) [%]				
				Unitário	Média (p/ origem)	DP (p/ origem)	Média to-tal	dp	Unitá-rio	Média (p/ ori-gem)	DP (p/ ori-gem)	Média total	dp	Unitá-rio	Média (p/ ori-gem)	DP (p/ ori-gem)	Média total	dp
B_PN1	119,28	77,49	151,60	1606,62	1606,62	-	1754,69	84,64	43,61	43,61	-	38,17	3,12	27,10	27,10	-	23,01	3,16
C_PN1	102,67	67,09	123,82	1806,56	1806,56	-			37,28	37,28	-			20,60	20,60	-		
E_PN1	104,04	67,83	129,30	1689,50	1689,50	-			41,09	41,09	-			24,28	24,28	-		
F_PN1	150,89	97,26	184,18	1732,86	1756,29	33,14			38,30	37,83	0,66			22,06	21,51	0,78		
F_PN2	125,82	81,62	152,19	1779,72					37,37					20,96				
I_PN1	112,75	73,20	138,20	1731,51	1731,51	-			39,15	39,15	-			22,57	22,57	-		
J_PN1	122,17	79,12	156,22	1581,73	1581,73	-			44,16	44,16	-			27,87	27,87	-		
K_PN1	148,01	95,68	175,59	1848,89	1834,26	108,81			34,51	34,58	3,67			18,63	18,94	3,15		
K_PN2	190,50	122,22	232,85	1718,87					38,28					22,23				
K_PN3	167,93	108,10	194,73	1935,00					30,94					15,96				
L_PN1	87,71	57,59	106,82	1778,45	1773,96	20,66	38,82	37,68	0,67	21,79	21,21	0,53						
L_PN2	136,38	88,21	165,14	1769,61			37,38			21,09								
L_PN3	151,21	97,70	183,18	1765,79			37,40			21,14								
L_PN4	109,20	71,07	131,56	1802,03			36,96			20,48								
L_PN5	151,89	97,98	185,06	1741,14			38,09			21,84								
L_PN6	124,15	80,74	150,10	1786,73			37,41			20,90								

⁽¹⁾ ρ_{20 °C} = 998,21 kg/m³

- **Provetes consolidados (PC)**

Tabela A.2 - Resultados individuais de massa volúmica aparente, porosidade aberta e teor máximo em água para os provetes consolidados (PC)

Provete	Massa seca (m _a) [g]	Massa hidrostá- tica (m _h) [g]	Massa satu- rada (m _s) [g]	Massa volúmica aparente (Mv _{ap}) (¹) (kg/m3)					Porosidade aberta (P _{ab}) [%]					Teor máximo em água (w) [%]				
				Unitário	Média (p/ origem)	DP (p/ origem)	Média total	dp	Unitá- rio	Média (p/ ori- gem)	DP (p/ ori- gem)	Média total	dp	Unitá- rio	Média (p/ ori- gem)	DP (p/ ori- gem)	Média total	dp
B_PC1	73,72	47,24	87,23	1840,16	1840,16	-	1909,12	140,07	33,78	33,78	-	30,30	5,32	18,33	18,33	-	17,84	3,41
C_PC1	133,59	84,29	158,49	1797,18	1797,18	-			33,56	33,56	-			18,64	18,64	-		
E_PC1	73,87	47,25	86,40	1883,47	1883,47	-			32,01	32,01	-			16,96	16,96	-		
F_PC1	117,58	74,41	136,56	1888,49	1886,54	2,75			30,54	29,84	0,99			16,14	15,79	0,50		
F_PC2	155,89	97,38	179,95	1884,59					29,14					15,43				
I_PC1	93,31	59,97	116,19	1656,76	1656,76	-			40,70	40,70	-			24,52	24,52	-		
J_PC1	76,38	47,83	91,67	1739,13	1739,13	-			34,88	34,88	-			20,02	20,02	-		
K_PC1	135,66	86,57	162,84	1775,50	1947,91	149,36			35,64	27,47	7,08			20,04	14,33	4,94		
K_PC2	182,92	114,52	204,12	2037,86					23,66					11,59				
K_PC3	230,17	143,16	256,32	2030,38					23,11					11,36				
L_PC1	109,58	69,92	124,15	2017,04	2002,07	127,89	26,87	27,96	4,73	13,30	14,11	3,16						
L_PC2	91,40	59,38	107,50	1896,02			33,46			17,61								
L_PC3	112,80	71,84	123,76	2168,68			21,11			9,72								
L_PC4	87,92	56,81	102,32	1928,43			31,64			16,38								
L_PC5	150,13	94,24	174,60	1864,87			30,45			16,30								
L_PC6	73,25	47,34	81,55	2137,35			24,26			11,33								

⁽¹⁾ ρ_{20 °C} = 998,21 kg/m³

A.2 Ensaio de absorção por capilaridade

Provetes sem tratamento (PN)

Tabela A. 3 – Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes B_PN1, E_PN1 e F_PN1

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _i -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	B_PN1	E_PN1	F_PN1	B_PN1	E_PN1	F_PN1	
29-09-2017	0	0,00	0,00	120,98	123,33	127,97	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,02	0,13	138,74	146,11	146,09	11,21	14,03	11,45	12,23
	3	0,05	0,22	139,44	146,15	146,25	11,65	14,06	11,55	12,42
	5	0,08	0,29	139,67	146,24	146,31	11,79	14,11	11,59	12,50
	10	0,17	0,41	140,34	146,28	146,77	12,22	14,14	11,88	12,74
	15	0,25	0,50	140,45	146,37	146,82	12,29	14,19	11,91	12,80
	30	0,50	0,71	140,85	146,51	146,89	12,54	14,28	11,96	12,92
	60	1,00	1,00	140,54	146,27	146,75	12,34	14,13	11,87	12,78

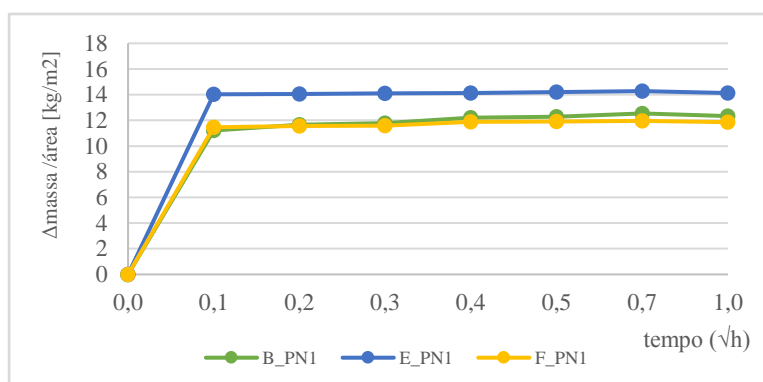


Figura A.1 Curva de capilaridade dos provetes B_PN1, E_PN1 e F_PN1

Tabela A. 4 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes F_PN2, I_PN1 e J_PN1

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _i -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	F_PN2	I_PN1	J_PN1	F_PN2	I_PN1	J_PN1	
29-09-2017	0	0,0	0,00	128,02	116,64	114,67	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,13	146,55	141,43	139,34	11,47	15,36	15,73	14,19
	2	0,0	0,18	146,9	141,81	139,35	11,69	15,60	15,74	14,34
	5	0,1	0,29	146,93	141,85	139,52	11,70	15,62	15,84	14,39
	10	0,2	0,41	147,13	141,94	139,57	11,83	15,68	15,88	14,46
	15	0,3	0,50	147,02	141,84	139,6	11,76	15,62	15,90	14,42
	30	0,5	0,71	146,92	141,64	139,38	11,70	15,49	15,76	14,32
	60	1,0	1,00	146,76	141,58	139,33	11,60	15,46	15,72	14,26

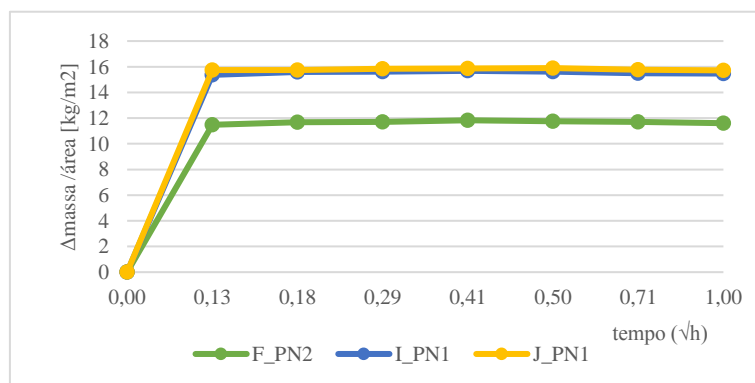


Figura A. 2 - Curva de capilaridade dos provetes F_PN2, I_PN1 e J_PN1

Tabela A. 5 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes K_PN1, K_PN2 e K_PN3

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas $[(m_i - m_0)/A]$			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	K_PN1	K_PN2	K_PN3	K_PN1	K_PN2	K_PN3	
29-09-2017	0	0,0	0,00	166,45	158,24	155,24	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,13	184,59	180,08	175,73	9,81	11,84	11,22	10,96
	2	0,0	0,18	187,31	180,90	176,29	11,28	12,29	11,53	11,70
	5	0,1	0,29	187,66	180,60	176,08	11,47	12,12	11,42	11,67
	10	0,2	0,41	187,43	180,64	176,21	11,35	12,15	11,49	11,66
	15	0,3	0,50	187,32	180,80	176,14	11,29	12,23	11,45	11,66
	30	0,5	0,71	187,41	180,71	176,22	11,34	12,18	11,49	11,67
	60	1,0	1,00	187,25	180,55	176,3	11,25	12,10	11,54	11,63

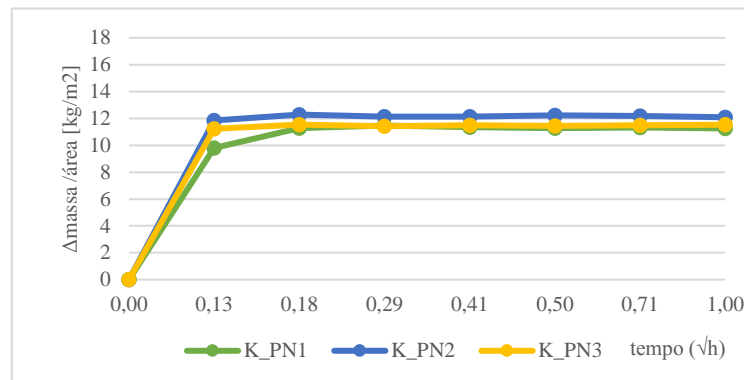


Figura A. 3 - Curva de capilaridade dos provetes K_PN1, K_PN2 e K_PN3

Tabela A. 6 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes L_PN1, L_PN2 e L_PN3

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas $[(m_i - m_0)/A]$			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PN1	L_PN2	L_PN3	L_PN1	L_PN2	L_PN3	
29-09-2017	0	0,0	0,00	154,30	147,11	152,21	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,13	177,47	168,33	175,28	12,73	11,44	12,49	12,22
	2	0,0	0,18	177,44	169,11	175,62	12,71	11,86	12,67	12,41
	5	0,1	0,29	177,63	169,23	175,68	12,82	11,92	12,70	12,48
	10	0,2	0,41	177,39	169,33	175,59	12,69	11,98	12,65	12,44
	15	0,3	0,50	177,34	169,67	175,35	12,66	12,16	12,52	12,45
	30	0,5	0,71	177,36	169,57	175,3	12,67	12,11	12,50	12,42
	60	1,0	1,00	177,38	169,59	175,22	12,68	12,12	12,45	12,42

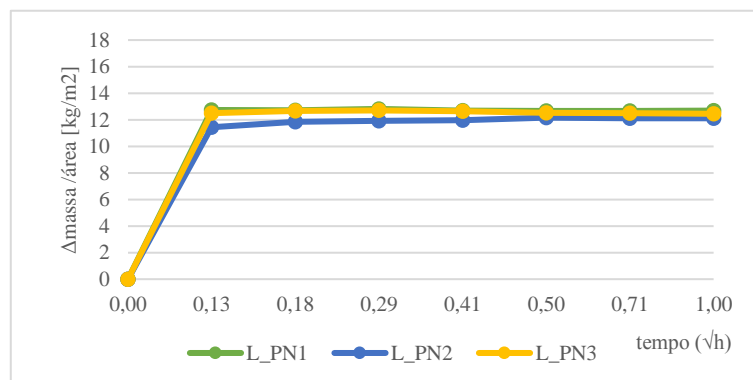


Figura A. 4 - Curva de capilaridade dos provetes L_PN1, L_PN2 e L_PN3

Tabela A. 7 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes L_PN4, L_PN5 e L_PN6

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _t -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PN4	L_PN5	L_PN6	L_PN4	L_PN5	L_PN6	
29-09-2017	0	0,0	0,00	157,44	154,57	122,11	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,13	180,53	176,10	143,75	12,62	11,77	12,51	12,30
	2	0,0	0,18	180,56	176,05	144,02	12,64	11,74	12,67	12,35
	5	0,1	0,29	180,43	176,00	144,00	12,57	11,71	12,66	12,31
	10	0,2	0,41	180,32	175,88	143,96	12,51	11,65	12,63	12,26
	15	0,3	0,50	180,31	175,95	144,04	12,50	11,68	12,68	12,29
	30	0,5	0,71	180,22	175,99	143,99	12,45	11,71	12,65	12,27
	60	1,0	1,00	180,18	175,99	144,05	12,43	11,71	12,69	12,27

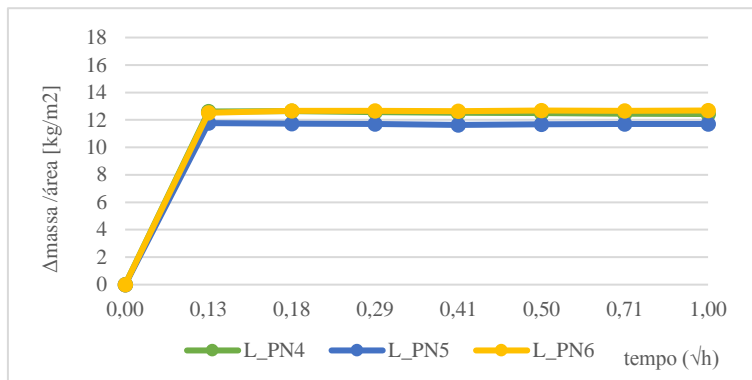


Figura A. 5 - Curva de capilaridade dos provetes L_PN4, L_PN5 e L_PN6

Provetes consolidados (PC)

Tabela A. 8 Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes B_PC1, E_PC1 e F_PC1

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _t -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	B_PC1	E_PC1	F_PC1	B_PC1	E_PC1	F_PC1	
02-10-2017	0	0,0	0,0	121,83	127,36	132,13	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,1	122,27	127,73	132,60	0,27	0,23	0,30	0,26
	3	0,1	0,2	122,31	128,06	132,77	0,30	0,43	0,40	0,38
	5	0,1	0,3	122,29	127,87	132,61	0,29	0,31	0,30	0,30
	10	0,2	0,4	122,16	127,80	132,60	0,20	0,27	0,30	0,26
	15	0,3	0,5	122,28	127,89	132,70	0,28	0,32	0,36	0,32
	30	0,5	0,7	122,34	127,92	132,77	0,32	0,34	0,40	0,35
	60	1,0	1,0	122,40	127,97	132,80	0,35	0,37	0,42	0,38
1d	1440	24,0	4,9	122,94	128,59	133,85	0,69	0,75	1,08	0,84
2d	2880	48,0	6,9	123,00	128,69	134,11	0,73	0,81	1,25	0,93
3d	4320	72,0	8,5	123,10	128,75	134,41	0,79	0,85	1,44	1,02
4d	5760	96,0	9,8	123,12	128,73	134,26	0,80	0,83	1,34	0,99
7d	10080	168,0	13,0	123,15	128,82	134,43	0,82	0,89	1,45	1,05
8d	11520	192,0	13,9	123,30	128,92	134,56	0,91	0,95	1,53	1,13
9d	12960	216,0	14,7	123,33	128,98	134,56	0,93	0,99	1,53	1,15
10d	14400	240,0	15,5	123,38	129,01	134,58	0,96	1,00	1,54	1,17
11d	15840	264,0	16,2	123,11	128,77	134,47	0,80	0,86	1,47	1,04

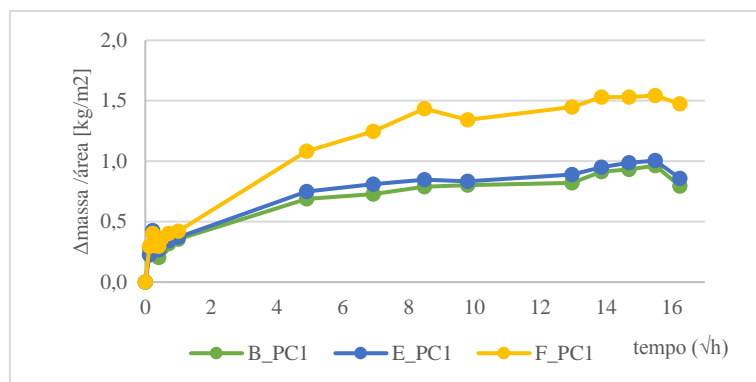


Figura A. 6 - Curva de capilaridade dos provetes B_PC1, E_PC1 e F_PC1

Tabela A. 9 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes F_PC2, I_PC1 e J_PC1

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _t -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	F_PC2	I_PC1	J_PC1	F_PC2	I_PC1	J_PC1	
02-10-2017	0	0,0	0,0	133,08	114,91	107,33	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,1	133,43	115,32	107,68	0,21	0,26	0,23	0,23
	2	0,0	0,2	133,40	115,39	107,68	0,20	0,30	0,23	0,24
	5	0,1	0,3	133,55	115,52	107,79	0,29	0,38	0,30	0,32
	10	0,2	0,4	133,55	115,56	107,86	0,29	0,41	0,34	0,35
	15	0,3	0,5	133,60	115,57	107,85	0,32	0,41	0,34	0,36
	30	0,5	0,7	133,61	115,63	107,86	0,32	0,45	0,34	0,37
	60	1,0	1,0	133,64	115,68	107,86	0,34	0,48	0,34	0,39
1d	1440	24,0	4,9	134,58	116,84	108,70	0,92	1,21	0,89	1,01
2d	2880	48,0	6,9	134,84	117,02	108,84	1,08	1,32	0,98	1,13
3d	4320	72,0	8,5	135,08	117,13	108,90	1,22	1,39	1,02	1,21
4d	5760	96,0	9,8	135,04	117,15	109,09	1,20	1,41	1,14	1,25
7d	10080	168,0	13,0	135,09	117,25	109,22	1,23	1,47	1,22	1,31
8d	11520	192,0	13,9	135,19	117,32	109,30	1,29	1,51	1,28	1,36
9d	12960	216,0	14,7	135,23	117,31	109,34	1,32	1,51	1,30	1,37
10d	14400	240,0	15,5	135,27	117,33	109,37	1,34	1,52	1,32	1,39
11d	15840	264,0	16,2	135,18	117,26	109,37	1,29	1,47	1,32	1,36

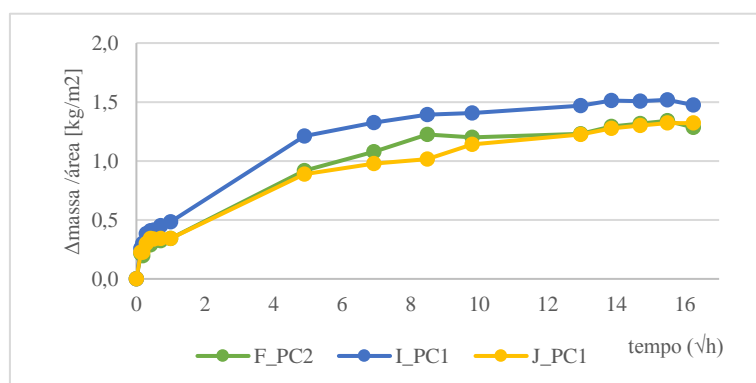


Figura A. 7 - Curva de capilaridade dos provetes F_PC2, I_PC1 e J_PC1

Tabela A. 10 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes K_PC1, K_PC2 e K_PC3

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _i -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	K_PC1	K_PC2	K_PC3	K_PC1	K_PC2	K_PC3	
02-10-2017	0	0,0	0,0	152,76	155,87	150,88	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,1	153,25	156,31	151,35	0,27	0,24	0,26	0,26
	2	0,0	0,2	153,25	156,35	151,35	0,27	0,27	0,26	0,26
	5	0,1	0,3	153,27	156,35	151,29	0,28	0,27	0,22	0,26
	10	0,2	0,4	153,32	156,36	151,28	0,31	0,27	0,22	0,27
	15	0,3	0,5	153,3	156,42	151,34	0,30	0,30	0,25	0,28
	30	0,5	0,7	153,38	156,39	151,35	0,34	0,29	0,26	0,30
	60	1,0	1,0	153,46	156,52	151,42	0,39	0,36	0,30	0,35
1d	1440	24,0	4,9	154,31	157,32	151,95	0,85	0,80	0,58	0,75
2d	2880	48,0	6,9	154,52	157,47	152,07	0,97	0,88	0,65	0,84
3d	4320	72,0	8,5	154,57	157,54	152,1	1,00	0,92	0,67	0,86
4d	5760	96,0	9,8	154,58	157,59	152,09	1,00	0,95	0,66	0,87
7d	10080	168,0	13,0	154,7	157,71	152,19	1,07	1,02	0,72	0,93
8d	11520	192,0	13,9	154,74	157,80	152,23	1,09	1,07	0,74	0,97
9d	12960	216,0	14,7	154,8	157,82	152,23	1,12	1,08	0,74	0,98
10d	14400	240,0	15,5	154,85	157,85	152,25	1,15	1,10	0,75	1,00
11d	15840	264,0	16,2	154,82	157,80	152,22	1,14	1,07	0,73	0,98

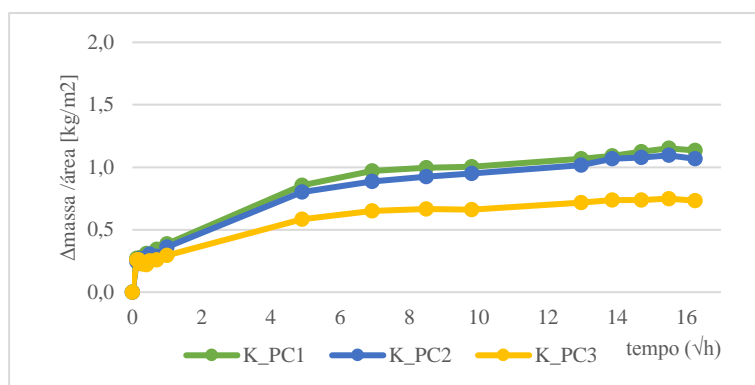


Figura A. 8 - Curva de capilaridade dos provetes K_PC1, K_PC2 e K_PC3

Tabela A. 11 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes L_PN1, L_PN2 e L_PN3

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _i -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PC1	L_PC2	L_PC3	L_PC1	L_PC2	L_PC3	
02-10-2017	0	0,0	0,0	166,68	156,91	162,20	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,1	167,12	157,44	162,71	0,24	0,29	0,28	0,27
	2	0,0	0,2	167,15	157,46	162,71	0,26	0,30	0,28	0,28
	5	0,1	0,3	167,23	157,48	162,72	0,30	0,31	0,28	0,30
	10	0,2	0,4	167,14	157,45	162,68	0,25	0,30	0,26	0,27
	15	0,3	0,5	167,26	157,54	162,77	0,32	0,35	0,31	0,33
	30	0,5	0,7	167,23	157,52	162,88	0,30	0,34	0,37	0,34
	60	1,0	1,0	167,33	157,61	162,88	0,36	0,38	0,37	0,37
1d	1440	24,0	4,9	167,94	158,34	163,51	0,70	0,79	0,71	0,73
2d	2880	48,0	6,9	168,17	158,54	163,65	0,82	0,90	0,79	0,84
3d	4320	72,0	8,5	168,15	158,62	163,71	0,81	0,94	0,82	0,86
4d	5760	96,0	9,8	168,24	158,62	163,83	0,86	0,94	0,88	0,90
7d	10080	168,0	13,0	168,24	158,73	163,90	0,86	1,00	0,92	0,93
8d	11520	192,0	13,9	168,34	158,72	163,97	0,92	1,00	0,96	0,96
9d	12960	216,0	14,7	168,36	158,76	163,99	0,93	1,02	0,97	0,97
10d	14400	240,0	15,5	168,42	158,82	164,01	0,96	1,05	0,98	1,00
11d	15840	264,0	16,2	168,35	158,72	163,94	0,92	1,00	0,94	0,95

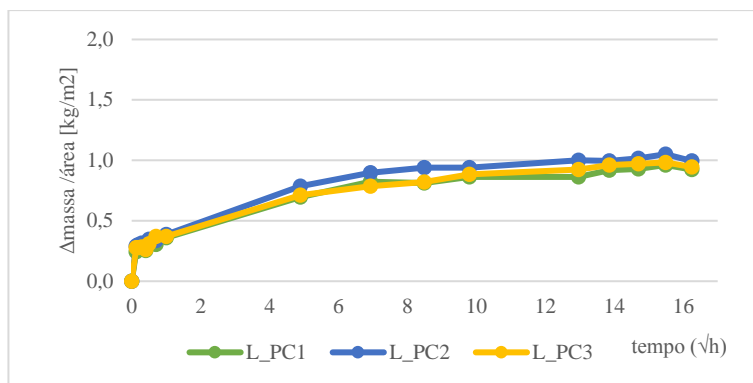


Figura A. 9 - - Curva de capilaridade dos provetes L_PC1, L_PC2 e L_PC3

Tabela A. 12 - Quantidades absorvidas no ensaio de capilaridade pelos provetes L_PN4, L_PN5 e L_PN6

Datas	Tempo			Massas (g)			Quantidades absorvidas [(m _i -m ₀)/A]			Média
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PC4	L_PC5	L_PC5	L_PC4	L_PC5	L_PC5	
02-10-2017	0	0,0	0,0	153,79	147,83	147,41	0,00	0,00	0,00	0,00
	1	0,0	0,1	154,29	148,30	147,86	0,27	0,26	0,25	0,26
	2	0,0	0,2	154,40	148,39	147,90	0,33	0,31	0,27	0,30
	5	0,1	0,3	154,43	148,41	147,95	0,35	0,32	0,30	0,32
	10	0,2	0,4	154,33	148,43	147,91	0,30	0,33	0,28	0,30
	15	0,3	0,5	154,44	148,43	147,94	0,36	0,33	0,30	0,33
	30	0,5	0,7	154,44	148,53	147,96	0,36	0,39	0,31	0,35
	60	1,0	1,0	154,56	148,63	148,03	0,42	0,44	0,35	0,40
1d	1440	24,0	4,9	155,38	149,03	148,41	0,87	0,66	0,56	0,70
2d	2880	48,0	6,9	155,63	149,30	148,58	1,01	0,81	0,65	0,82
3d	4320	72,0	8,5	155,57	149,23	148,62	0,97	0,77	0,67	0,81
4d	5760	96,0	9,8	155,63	149,30	148,68	1,01	0,81	0,71	0,84
7d	10080	168,0	13,0	155,74	149,44	148,79	1,07	0,89	0,77	0,91
8d	11520	192,0	13,9	155,69	149,41	148,85	1,04	0,87	0,80	0,90
9d	12960	216,0	14,7	155,72	149,40	148,86	1,06	0,86	0,81	0,91
10d	14400	240,0	15,5	155,77	149,44	148,92	1,08	0,89	0,84	0,94
11d	15840	264,0	16,2	155,81	149,47	148,96	1,10	0,90	0,86	0,96

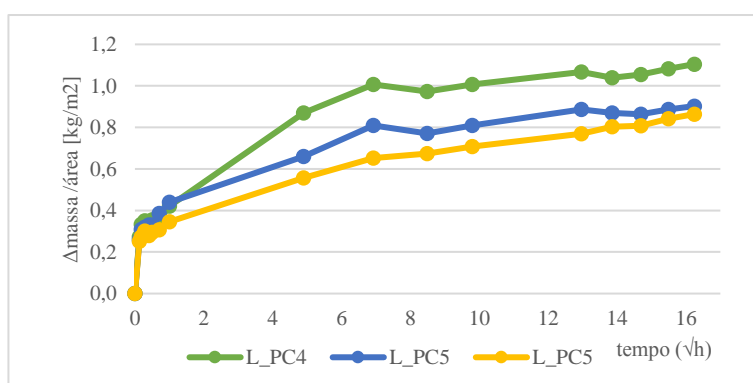


Figura A. 10 - Curva de capilaridade dos provetes L_PC4, L_PC5 e L_PC6

Provetes sem tratamento (PN)

Tabela A. 13 - Quantidades de água libertada pelos provetes B_PN1, E_PN1 e F_PN1

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[mi-nutos]	[ho-ras]	[ho-ras 1/2]	B_PN1	E_PN1	F_PN1	B_PN1	E_PN1	F_PN1
02-10-2017	0	0,0	0,00	146,19	149,15	149,13	15,38	15,39	12,85
	10	0,2	0,41	146,14	149,12	149,10	15,35	15,37	12,83
	20	0,3	0,58	146,11	149,07	149,06	15,33	15,34	12,80
	30	0,5	0,71	146,07	149,04	149,03	15,31	15,33	12,79
	40	0,7	0,82	146,02	149,00	148,99	15,28	15,30	12,76
	50	0,8	0,91	145,99	148,94	148,95	15,26	15,26	12,74
	60	1,0	1,00	145,95	148,93	148,91	15,23	15,26	12,71
	120	2,0	1,41	145,78	148,73	148,74	15,12	15,13	12,60
	180	3,0	1,73	145,64	148,58	148,61	15,04	15,04	12,52
	240	4,0	2,00	145,41	148,34	148,41	14,89	14,89	12,39
	300	5,0	2,24	145,27	148,20	148,28	14,80	14,81	12,31
	360	6,0	2,45	145,03	147,93	148,05	14,65	14,64	12,17
	1380	23,0	4,80	142,34	144,72	144,95	12,95	12,66	10,21
	1440	24,0	4,90	142,12	144,50	144,75	12,82	12,53	10,08
1d	1500	25,0	5,00	141,95	144,31	144,58	12,71	12,41	9,97
	1560	26,0	5,10	141,78	144,13	144,42	12,60	12,30	9,87
	1620	27,0	5,20	141,60	143,95	144,28	12,49	12,19	9,78
	1680	28,0	5,29	141,39	143,72	144,07	12,35	12,05	9,65
2d	2820	47,0	6,86	138,26	140,20	141,01	10,38	9,88	7,72
	2880	48,0	6,93	137,87	139,76	140,65	10,13	9,61	7,49
	3060	51,0	7,14	137,46	139,31	140,28	9,88	9,33	7,26
	3180	53,0	7,28	137,10	138,93	139,94	9,65	9,10	7,04
3d	4320	72,0	8,49	133,98	135,34	136,90	7,68	6,89	5,12
	4620	77,0	8,77	132,90	134,16	135,97	7,00	6,16	4,53
4d	5700	95,0	9,75	129,73	130,65	132,99	5,00	4,00	2,65
	6000	100,0	10,00	128,91	129,82	132,36	4,48	3,49	2,25
7d	10560	176,0	13,27	122,88	124,98	129,45	0,68	0,51	0,41
8d	12000	200,0	14,14	122,44	124,60	129,22	0,40	0,27	0,27
9d	13440	224,0	14,97	122,09	124,32	129,04	0,18	0,10	0,15
10d	14880	248,0	15,75	121,91	124,25	128,97	0,06	0,06	0,11
11d	16320	272,0	16,49	121,86	124,24	128,97	0,03	0,05	0,11
12d	20640	344,0	18,55	121,85	124,22	128,95	0,03	0,04	0,09
13d	22080	368,0	19,18	121,84	124,22	128,95	0,02	0,04	0,09

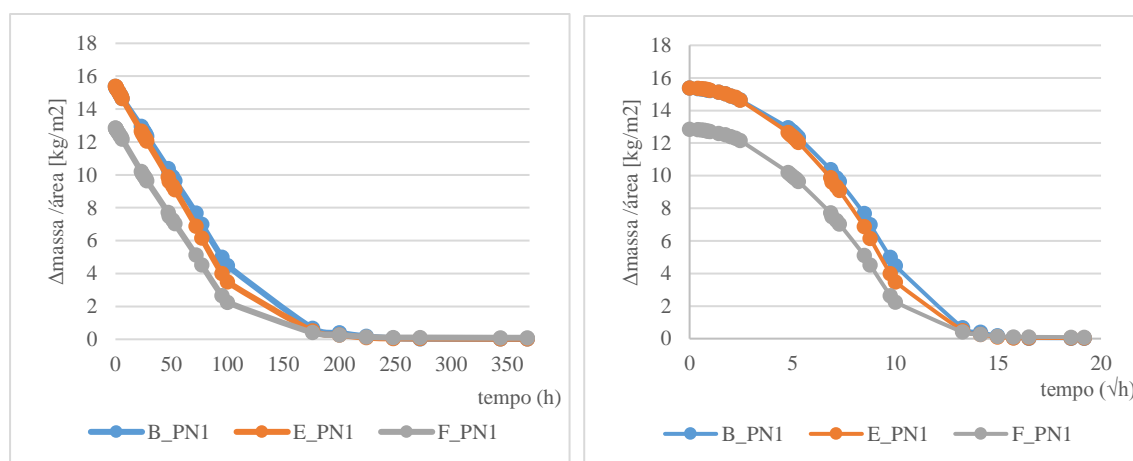


Figura A. 11 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes B_PN1, E_PN1 e F_PN1

Tabela A. 14 - Quantidades de água libertada pelos provetes F_PN2, I_PN1 e J_PN1

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	F_PN2	I_PN1	J_PN1	F_PN2	I_PN1	J_PN1
02-10-2017	0	0,0	0,00	148,53	145,00	142,73	12,31	17,00	17,68
	10	0,2	0,41	148,48	144,99	142,71	12,27	16,99	17,67
	20	0,3	0,58	148,45	144,96	142,68	12,26	16,97	17,65
	30	0,5	0,71	148,41	144,89	142,63	12,23	16,93	17,62
	40	0,7	0,82	148,37	144,85	142,58	12,21	16,91	17,59
	50	0,8	0,91	148,34	144,81	142,53	12,19	16,88	17,55
	60	1,0	1,00	148,30	144,76	142,49	12,16	16,85	17,53
	120	2,0	1,41	148,14	144,58	142,31	12,06	16,74	17,41
	180	3,0	1,73	148,01	144,42	142,17	11,98	16,64	17,32
	240	4,0	2,00	147,82	144,18	141,93	11,87	16,49	17,17
	300	5,0	2,24	147,70	144,03	141,81	11,79	16,40	17,09
	360	6,0	2,45	147,49	143,77	141,55	11,66	16,24	16,93
	1380	23,0	4,80	144,74	140,60	138,44	9,96	14,27	14,95
	1440	24,0	4,90	144,56	140,40	138,23	9,85	14,15	14,81
1d	1500	25,0	5,00	144,38	140,21	138,07	9,74	14,03	14,71
	1560	26,0	5,10	144,23	140,02	137,88	9,64	13,91	14,59
	1620	27,0	5,20	144,09	139,83	137,72	9,56	13,80	14,49
	1680	28,0	5,29	143,89	139,61	137,51	9,43	13,66	14,35
2d	2820	47,0	6,86	141,03	136,42	134,34	7,66	11,68	12,33
	2880	48,0	6,93	140,66	135,96	133,93	7,43	11,40	12,07
	3060	51,0	7,14	140,26	135,51	133,52	7,19	11,12	11,81
	3180	53,0	7,28	139,93	135,13	133,15	6,98	10,88	11,57
3d	4320	72,0	8,49	137,02	131,92	129,95	5,18	8,89	9,53
	4620	77,0	8,77	136,02	130,74	128,87	4,56	8,16	8,84
4d	5700	95,0	9,75	133,21	127,51	125,21	2,82	6,16	6,51
	6000	100,0	10,00	132,50	126,68	124,37	2,38	5,65	5,97
7d	10560	176,0	13,27	129,12	119,51	116,74	0,29	1,20	1,11
8d	12000	200,0	14,14	128,92	118,88	116,11	0,17	0,81	0,71
9d	13440	224,0	14,97	128,77	118,38	115,67	0,07	0,50	0,43
10d	14880	248,0	15,75	128,75	118,03	115,37	0,06	0,29	0,24
11d	16320	272,0	16,49	128,74	117,75	115,17	0,06	0,11	0,11
12d	20640	344,0	18,55	128,73	117,62	115,12	0,05	0,03	0,08
13d	22080	368,0	19,18	128,72	117,61	115,11	0,04	0,02	0,07

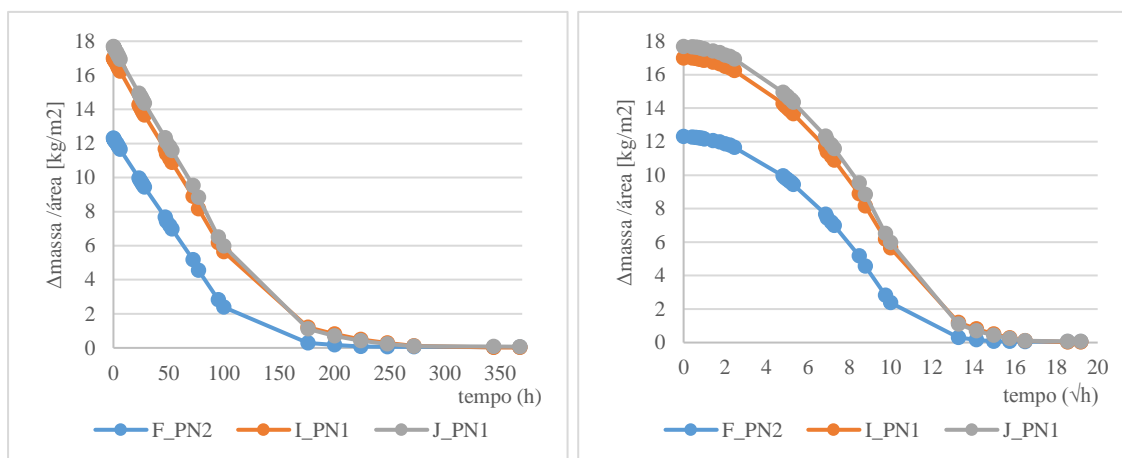


Figura A. 12 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes F_PN2, I_PN1 e J_PN1

Tabela A. 15 - Quantidades de água libertada pelos provetes K_PN1, K_PN2 e K_PN3

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	K_PN1	K_PN2	K_PN3	K_PN1	K_PN2	K_PN3
02-10-2017	0	0,0	0,00	189,98	182,73	178,90	12,22	12,83	12,45
	10	0,2	0,41	189,94	182,68	178,86	12,20	12,80	12,43
	20	0,3	0,58	189,89	182,65	178,82	12,17	12,79	12,41
	30	0,5	0,71	189,83	182,60	178,78	12,14	12,76	12,38
	40	0,7	0,82	189,80	182,55	178,72	12,13	12,73	12,35
	50	0,8	0,91	189,73	182,50	178,68	12,09	12,71	12,33
	60	1,0	1,00	189,69	182,46	178,65	12,07	12,68	12,31
	120	2,0	1,41	189,47	182,22	178,43	11,95	12,55	12,19
	180	3,0	1,73	189,29	182,06	178,28	11,85	12,47	12,11
	240	4,0	2,00	189,02	181,79	178,05	11,70	12,32	11,98
	300	5,0	2,24	188,86	181,64	177,89	11,62	12,24	11,90
	360	6,0	2,45	188,56	181,32	177,63	11,46	12,07	11,75
	1380	23,0	4,80	184,43	177,44	174,35	9,22	9,96	9,96
	1440	24,0	4,90	184,19	177,19	174,12	9,09	9,83	9,83
1d	1500	25,0	5,00	183,96	176,94	173,90	8,97	9,69	9,71
	1560	26,0	5,10	183,75	176,73	173,70	8,85	9,58	9,60
	1620	27,0	5,20	183,57	176,52	173,52	8,76	9,46	9,50
	1680	28,0	5,29	183,31	176,25	173,28	8,62	9,32	9,37
2d	2820	47,0	6,86	179,62	172,49	169,89	6,62	7,28	7,52
	2880	48,0	6,93	179,19	171,99	169,38	6,39	7,01	7,24
	3060	51,0	7,14	178,70	171,46	168,91	6,12	6,72	6,98
	3180	53,0	7,28	178,28	171,00	168,49	5,90	6,47	6,75
3d	4320	72,0	8,49	174,85	167,32	165,12	4,04	4,47	4,90
	4620	77,0	8,77	173,74	166,00	163,90	3,44	3,76	4,23
4d	5700	95,0	9,75	170,91	162,43	160,34	1,91	1,82	2,28
	6000	100,0	10,00	170,37	161,84	159,60	1,62	1,50	1,88
7d	10560	176,0	13,27	168,33	160,06	156,94	0,51	0,54	0,42
8d	12000	200,0	14,14	168,05	159,77	156,62	0,36	0,38	0,25
9d	13440	224,0	14,97	167,81	159,53	156,40	0,23	0,25	0,13
10d	14880	248,0	15,75	167,63	159,35	156,26	0,14	0,15	0,05
11d	16320	272,0	16,49	167,53	159,26	156,24	0,08	0,10	0,04
12d	20640	344,0	18,55	167,48	159,24	156,22	0,05	0,09	0,03
13d	22080	368,0	19,18	167,47	159,24	156,21	0,05	0,09	0,02

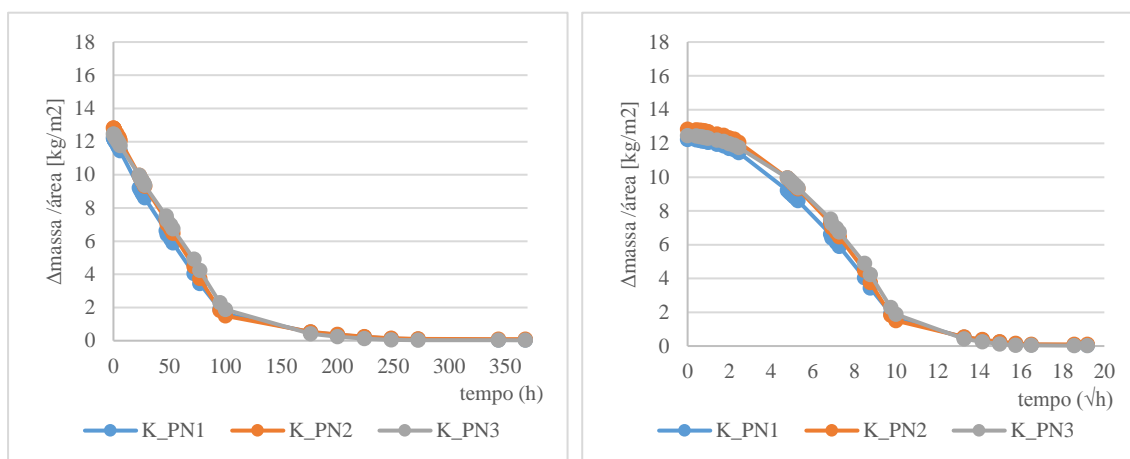


Figura A. 13 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes K_PN1, K_PN2 e K_PN3

Tabela A. 16 - Quantidades de água libertada pelos provetes L_PN1, L_PN2 e L_PN3

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PN1	L_PN2	L_PN3	L_PN1	L_PN2	L_PN3
02-10-2017	0	0,0	0,00	179,73	173,15	177,57	13,46	13,62	13,22
	10	0,2	0,41	179,70	173,12	177,53	13,44	13,60	13,19
	20	0,3	0,58	179,66	173,08	177,50	13,42	13,58	13,18
	30	0,5	0,71	179,59	173,03	177,46	13,38	13,56	13,16
	40	0,7	0,82	179,56	172,98	177,40	13,37	13,53	13,12
	50	0,8	0,91	179,50	172,94	177,35	13,33	13,51	13,10
	60	1,0	1,00	179,47	172,90	177,31	13,32	13,49	13,08
	120	2,0	1,41	179,25	172,69	177,10	13,20	13,37	12,96
	180	3,0	1,73	179,09	172,55	176,94	13,11	13,30	12,88
	240	4,0	2,00	178,84	172,30	176,67	12,97	13,16	12,73
	300	5,0	2,24	178,68	172,15	176,51	12,88	13,08	12,64
	360	6,0	2,45	178,38	171,88	176,22	12,72	12,94	12,49
	1380	23,0	4,80	174,70	168,60	172,72	10,70	11,17	10,59
	1440	24,0	4,90	174,48	168,38	172,46	10,58	11,05	10,45
1d	1500	25,0	5,00	174,26	168,18	172,23	10,45	10,94	10,33
	1560	26,0	5,10	174,05	168,00	172,03	10,34	10,84	10,22
	1620	27,0	5,20	173,87	167,80	171,84	10,24	10,74	10,12
	1680	28,0	5,29	173,62	167,59	171,58	10,10	10,62	9,97
2d	2820	47,0	6,86	170,11	164,39	168,04	8,17	8,90	8,06
	2880	48,0	6,93	169,66	163,96	167,59	7,93	8,67	7,82
	3060	51,0	7,14	169,16	163,52	167,08	7,65	8,43	7,54
	3180	53,0	7,28	168,77	163,13	166,65	7,44	8,22	7,31
3d	4320	72,0	8,49	165,42	159,94	163,22	5,60	6,50	5,45
	4620	77,0	8,77	164,15	158,92	162,00	4,90	5,95	4,79
4d	5700	95,0	9,75	160,65	155,52	158,35	2,98	4,12	2,81
	6000	100,0	10,00	159,80	154,74	157,51	2,51	3,70	2,36
7d	10560	176,0	13,27	156,15	149,41	154,00	0,51	0,82	0,46
8d	12000	200,0	14,14	155,82	148,93	153,67	0,32	0,57	0,28
9d	13440	224,0	14,97	155,53	148,55	153,40	0,16	0,36	0,14
10d	14880	248,0	15,75	155,34	148,25	153,21	0,06	0,20	0,03
11d	16320	272,0	16,49	155,27	148,02	153,18	0,02	0,08	0,02
12d	20640	344,0	18,55	155,25	147,94	153,16	0,01	0,03	0,01
13d	22080	368,0	19,18	155,25	147,93	153,16	0,01	0,03	0,01

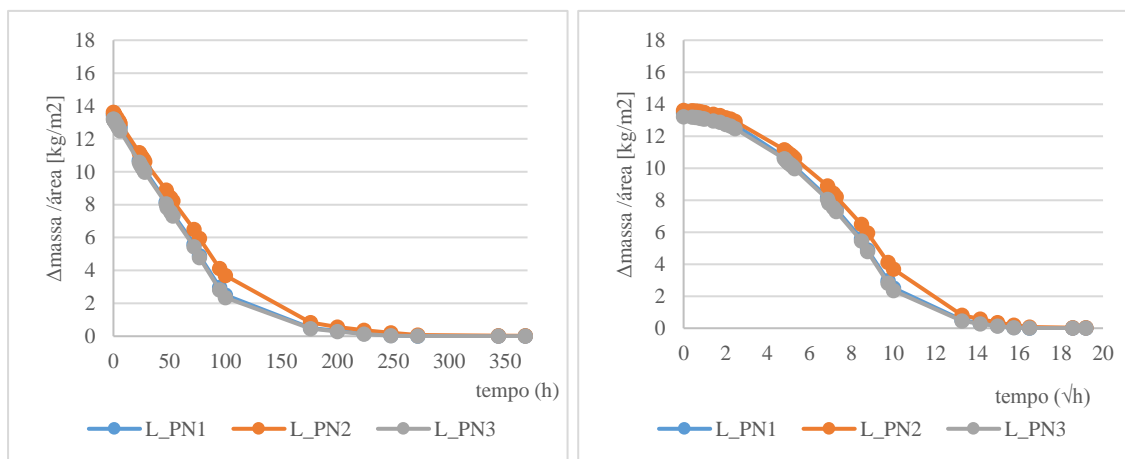


Figura A. 14 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes L_PN1, L_PN2 e L_PN3

Tabela A. 17 - Quantidades de água libertada pelos provetes L_PN4, L_PN5 e L_PN6

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PN4	L_PN5	L_PN6	L_PN4	L_PN5	L_PN6
02-10-2017	0	0,0	0,00	182,81	177,70	148,85	13,38	12,13	14,93
	10	0,2	0,41	182,78	177,67	148,82	13,37	12,12	14,91
	20	0,3	0,58	182,74	177,63	148,81	13,35	12,09	14,91
	30	0,5	0,71	182,67	177,58	148,78	13,31	12,07	14,89
	40	0,7	0,82	182,62	177,55	148,75	13,28	12,05	14,87
	50	0,8	0,91	182,57	177,50	148,70	13,25	12,02	14,84
	60	1,0	1,00	182,53	177,47	148,67	13,23	12,01	14,83
	120	2,0	1,41	182,28	177,30	148,52	13,09	11,91	14,74
	180	3,0	1,73	182,11	177,14	148,38	13,00	11,83	14,66
	240	4,0	2,00	181,81	176,92	148,16	12,84	11,71	14,53
	300	5,0	2,24	181,63	176,80	148,05	12,74	11,64	14,47
	360	6,0	2,45	181,32	176,55	147,82	12,57	11,50	14,33
	1380	23,0	4,80	176,91	173,94	145,53	10,16	10,08	13,01
	1440	24,0	4,90	176,66	173,74	145,36	10,02	9,97	12,91
1d	1500	25,0	5,00	176,41	173,55	145,18	9,88	9,86	12,81
	1560	26,0	5,10	176,20	173,39	145,03	9,77	9,78	12,72
	1620	27,0	5,20	175,98	173,24	144,89	9,65	9,69	12,64
	1680	28,0	5,29	175,71	173,04	144,70	9,50	9,59	12,53
2d	2820	47,0	6,86	171,78	170,27	142,14	7,35	8,07	11,05
	2880	48,0	6,93	171,27	169,90	141,78	7,07	7,87	10,84
	3060	51,0	7,14	170,76	169,51	141,42	6,80	7,66	10,63
	3180	53,0	7,28	170,31	169,18	141,09	6,55	7,48	10,44
3d	4320	72,0	8,49	166,58	166,50	138,55	4,51	6,01	8,97
	4620	77,0	8,77	165,26	165,52	137,61	3,79	5,48	8,43
4d	5700	95,0	9,75	161,68	162,77	134,84	1,83	3,97	6,83
	6000	100,0	10,00	160,94	162,11	134,14	1,43	3,61	6,42
7d	10560	176,0	13,27	159,11	156,82	126,32	0,43	0,72	1,90
8d	12000	200,0	14,14	158,84	156,40	125,24	0,28	0,49	1,28
9d	13440	224,0	14,97	158,62	156,09	124,71	0,16	0,32	0,97
10d	14880	248,0	15,75	158,46	155,85	124,38	0,07	0,19	0,78
11d	16320	272,0	16,49	158,41	155,69	124,12	0,04	0,10	0,63
12d	20640	344,0	18,55	158,38	155,62	124,05	0,03	0,07	0,59
13d	22080	368,0	19,18	158,38	155,61	124,05	0,03	0,06	0,59

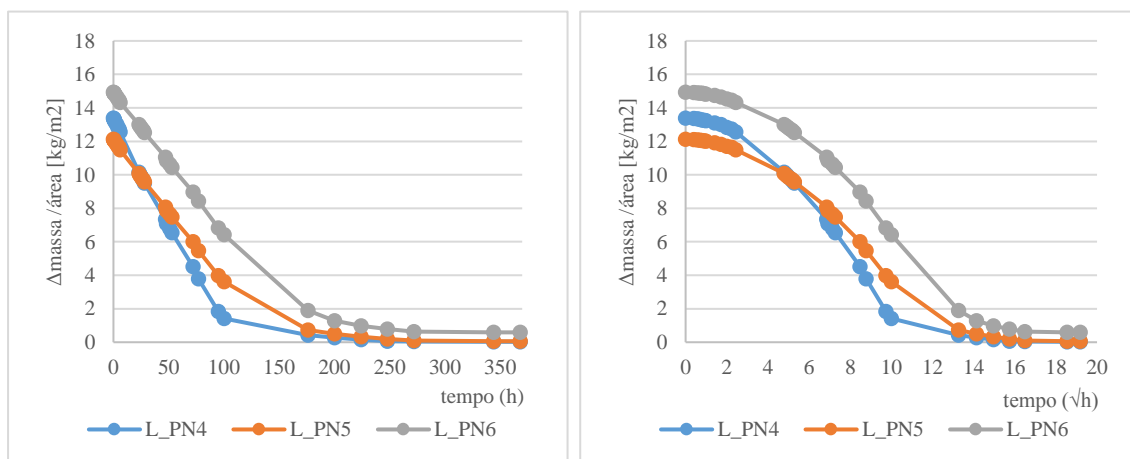


Figura A. 15 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes L_PN4, L_PN5 e L_PN6

Provetes consolidados (PC)

Tabela A. 18 - Quantidades de água libertada pelos provetes B_PC1, E_PC1 e F_PC1

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	B_PC1	E_PC1	F_PC1	B_PC1	E_PC1	F_PC1
13-10-2017	0	0,0	0,00	124,90	130,60	135,33	1,47	1,58	1,85
	10	0,2	0,41	124,89	130,57	135,31	1,47	1,56	1,84
	20	0,3	0,58	124,86	130,56	135,28	1,45	1,56	1,82
	30	0,5	0,71	124,85	130,53	135,27	1,44	1,54	1,81
	40	0,7	0,82	124,83	130,50	135,25	1,43	1,52	1,80
	50	0,8	0,91	124,80	130,49	135,24	1,41	1,52	1,79
	60	1,0	1,00	124,79	130,47	135,23	1,40	1,50	1,79
	120	2,00	1,41	124,74	130,41	135,16	1,37	1,47	1,74
	180	3,00	1,73	124,69	130,36	135,12	1,34	1,44	1,72
	1080	18,00	4,24	124,32	129,97	134,77	1,11	1,20	1,50
	1140	19,00	4,36	124,28	129,91	134,76	1,09	1,16	1,49
	1200	20,00	4,47	124,27	129,90	134,75	1,08	1,16	1,49
	1260	21,00	4,58	124,27	129,88	134,74	1,08	1,14	1,48
	4020	67,00	8,19	123,31	128,91	133,92	0,48	0,55	0,96
3d	4440	74,00	8,60	123,22	128,84	133,87	0,43	0,51	0,93
4d	5520	92,00	9,59	123,02	128,64	133,69	0,30	0,39	0,82
	5880	98,00	9,90	122,97	128,60	133,67	0,27	0,37	0,81
5d	6960	116,0	10,77	122,84	128,43	133,50	0,19	0,26	0,70
	7380	123,0	11,09	122,79	128,38	133,45	0,16	0,23	0,67
6d	8460	141,0	11,87	122,72	128,28	133,31	0,12	0,17	0,58
	8760	146,0	12,08	122,71	128,25	133,29	0,11	0,15	0,57
7d	9840	164,0	12,81	122,71	128,18	133,16	0,11	0,11	0,48
	10140	169,0	13,00	122,71	128,18	133,14	0,11	0,11	0,47
10d	14700	245,0	15,65	122,70	128,18	133,03	0,11	0,11	0,40

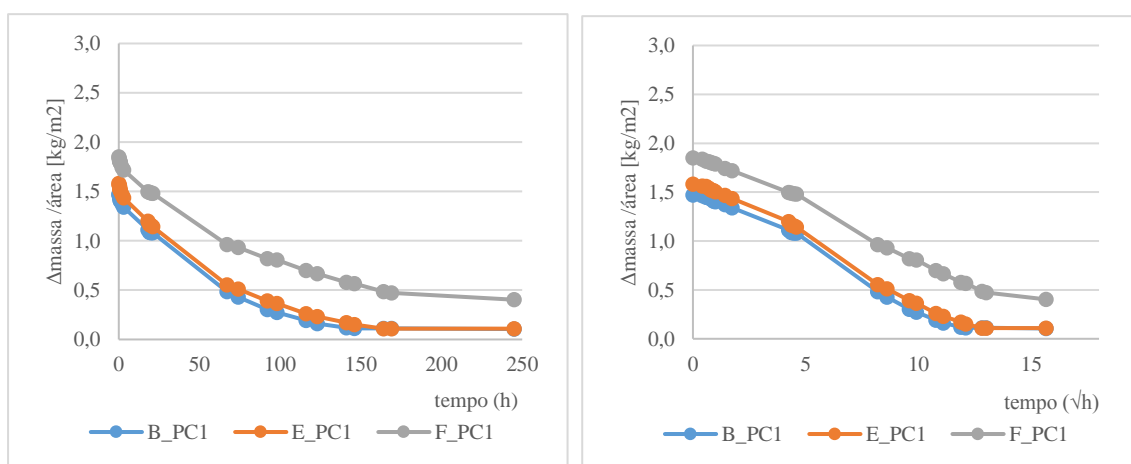


Figura A. 16 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes B_PC1, E_PC1 e F_PC1

Tabela A. 19 - Quantidades de água libertada pelos provetes F_PC2, I_PC1 e J_PC1

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	F_PC2	I_PC1	J_PC1	F_PC2	I_PC1	J_PC1
13-10-2017	0	0,0	0,00	137,15	119,55	111,78	2,26	2,88	2,49
	10	0,2	0,41	137,13	119,51	111,76	2,25	2,85	2,47
	20	0,3	0,58	137,11	119,50	111,74	2,23	2,85	2,46
	30	0,5	0,71	137,08	119,48	111,70	2,22	2,84	2,43
	40	0,7	0,82	137,07	119,47	111,69	2,21	2,83	2,43
	50	0,8	0,91	137,06	119,45	111,68	2,20	2,82	2,42
	60	1,0	1,00	137,04	119,43	111,67	2,19	2,80	2,42
	120	2,00	1,41	136,95	119,34	111,59	2,14	2,75	2,36
	180	3,00	1,73	136,89	119,25	111,54	2,10	2,69	2,33
	1080	18,00	4,24	136,13	118,17	110,86	1,63	2,01	1,89
	1140	19,00	4,36	136,09	118,12	110,83	1,61	1,98	1,87
	1200	20,00	4,47	136,05	118,09	110,79	1,59	1,96	1,85
	1260	21,00	4,58	136,01	118,08	110,76	1,56	1,96	1,83
3d	4020	67,00	8,19	134,96	116,99	109,19	0,92	1,27	0,81
	4440	74,00	8,60	134,91	116,91	109,08	0,89	1,22	0,74
4d	5520	92,00	9,59	134,72	116,72	108,80	0,77	1,10	0,56
	5880	98,00	9,90	134,68	116,67	108,73	0,75	1,07	0,51
5d	6960	116,0	10,77	134,49	116,46	108,49	0,63	0,94	0,36
	7380	123,0	11,09	134,45	116,40	108,42	0,61	0,90	0,31
6d	8460	141,0	11,87	134,30	116,21	108,28	0,51	0,78	0,22
	8760	146,0	12,08	134,29	116,19	108,25	0,51	0,77	0,20
7d	9840	164,0	12,81	134,14	116,04	108,16	0,42	0,68	0,14
	10140	169,0	13,00	134,10	116,00	108,16	0,39	0,65	0,14
10d	14700	245,0	15,65	133,98	115,88	108,16	0,32	0,58	0,14

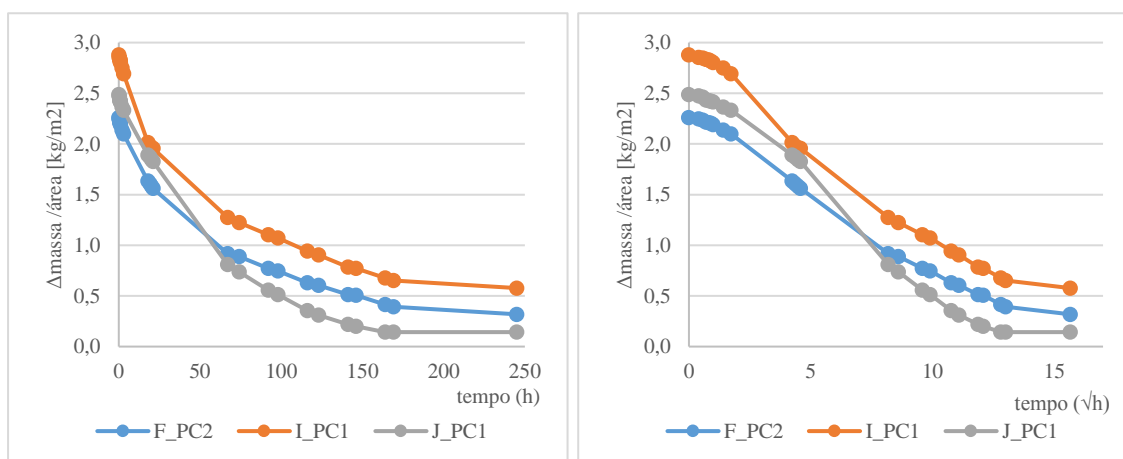


Figura A. 17 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes F_PC2, I_PC1 e J_PC1

Tabela A. 20 - Quantidades de água libertada pelos provetes K_PC1, K_PC2 e K_PC3

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	K_PC1	K_PC2	K_PC3	K_PC1	K_PC2	K_PC3
13-10-2017	0	0,0	0,00	156,23	159,76	153,81	1,84	2,05	1,33
	10	0,2	0,41	156,21	159,74	153,78	1,82	2,04	1,32
	20	0,3	0,58	156,18	159,70	153,75	1,81	2,02	1,30
	30	0,5	0,71	156,15	159,69	153,72	1,79	2,01	1,28
	40	0,7	0,82	156,14	159,68	153,70	1,79	2,01	1,27
	50	0,8	0,91	156,11	159,66	153,69	1,77	2,00	1,27
	60	1,0	1,00	156,09	159,64	153,67	1,76	1,99	1,26
	120	2,00	1,41	155,96	159,53	153,56	1,69	1,92	1,20
	180	3,00	1,73	155,87	159,45	153,48	1,64	1,88	1,15
	1080	18,00	4,24	155,25	158,61	152,96	1,30	1,42	0,87
	1140	19,00	4,36	155,23	158,60	152,93	1,28	1,41	0,85
	1200	20,00	4,47	155,22	158,56	152,91	1,28	1,39	0,84
	1260	21,00	4,58	155,22	158,56	152,90	1,28	1,39	0,84
3d	4020	67,00	8,19	154,39	157,71	152,15	0,82	0,92	0,43
	4440	74,00	8,60	154,35	157,67	152,11	0,80	0,90	0,40
4d	5520	92,00	9,59	154,19	157,52	151,97	0,71	0,81	0,33
	5880	98,00	9,90	154,17	157,46	151,94	0,70	0,78	0,31
5d	6960	116,0	10,77	154,00	157,30	151,83	0,61	0,69	0,25
	7380	123,0	11,09	153,96	157,25	151,81	0,58	0,66	0,24
6d	8460	141,0	11,87	153,82	157,09	151,72	0,51	0,58	0,19
	8760	146,0	12,08	153,78	157,06	151,70	0,48	0,56	0,18
7d	9840	164,0	12,81	153,67	156,94	151,66	0,42	0,49	0,16
	10140	169,0	13,00	153,63	156,91	151,63	0,40	0,48	0,14
10d	14700	245,0	15,65	153,55	156,79	151,60	0,36	0,41	0,13

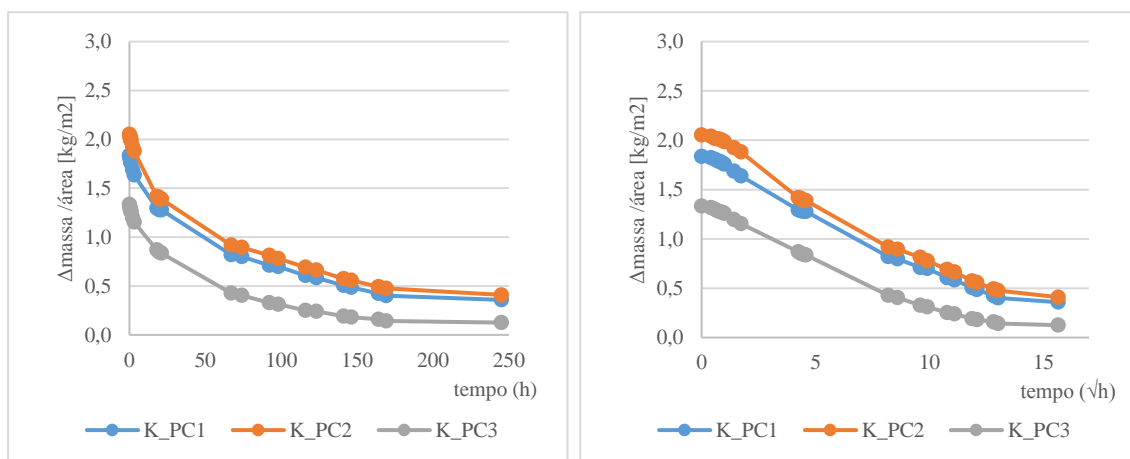


Figura A. 18 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes K_PC1, K_PC2 e K_PC3

Tabela A. 21 - Quantidades de água libertada pelos provetes L_PC1, L_PC2 e L_PC3

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PC1	L_PC2	L_PC3	L_PC1	L_PC2	L_PC3
13-10-2017	0	0,0	0,00	169,87	160,57	165,15	1,56	1,89	1,36
	10	0,2	0,41	169,83	160,55	165,10	1,54	1,88	1,33
	20	0,3	0,58	169,82	160,52	165,08	1,53	1,86	1,32
	30	0,5	0,71	169,79	160,51	165,05	1,51	1,86	1,30
	40	0,7	0,82	169,76	160,49	165,02	1,50	1,85	1,29
	50	0,8	0,91	169,75	160,46	165,00	1,49	1,83	1,28
	60	1,0	1,00	169,73	160,46	164,99	1,48	1,83	1,27
	120	2,00	1,41	169,63	160,36	164,93	1,43	1,78	1,24
	180	3,00	1,73	169,53	160,28	164,89	1,37	1,73	1,22
	1080	18,00	4,24	168,99	159,62	164,53	1,07	1,37	1,02
	1140	19,00	4,36	168,98	159,62	164,51	1,07	1,37	1,01
	1200	20,00	4,47	168,97	159,60	164,50	1,06	1,36	1,00
	1260	21,00	4,58	168,97	159,56	164,48	1,06	1,34	0,99
3d	4020	67,00	8,19	168,34	158,70	163,72	0,71	0,86	0,58
	4440	74,00	8,60	168,31	158,67	163,67	0,70	0,85	0,55
4d	5520	92,00	9,59	168,18	158,50	163,50	0,62	0,75	0,46
	5880	98,00	9,90	168,16	158,46	163,46	0,61	0,73	0,44
5d	6960	116,0	10,77	168,02	158,30	163,33	0,54	0,64	0,37
	7380	123,0	11,09	167,97	158,25	163,28	0,51	0,62	0,34
6d	8460	141,0	11,87	167,86	158,09	163,15	0,45	0,53	0,27
	8760	146,0	12,08	167,83	158,07	163,15	0,43	0,52	0,27
7d	9840	164,0	12,81	167,72	157,95	163,05	0,37	0,45	0,22
	10140	169,0	13,00	167,69	157,94	163,02	0,35	0,45	0,20
10d	14700	245,0	15,65	167,59	157,86	163,01	0,30	0,40	0,20

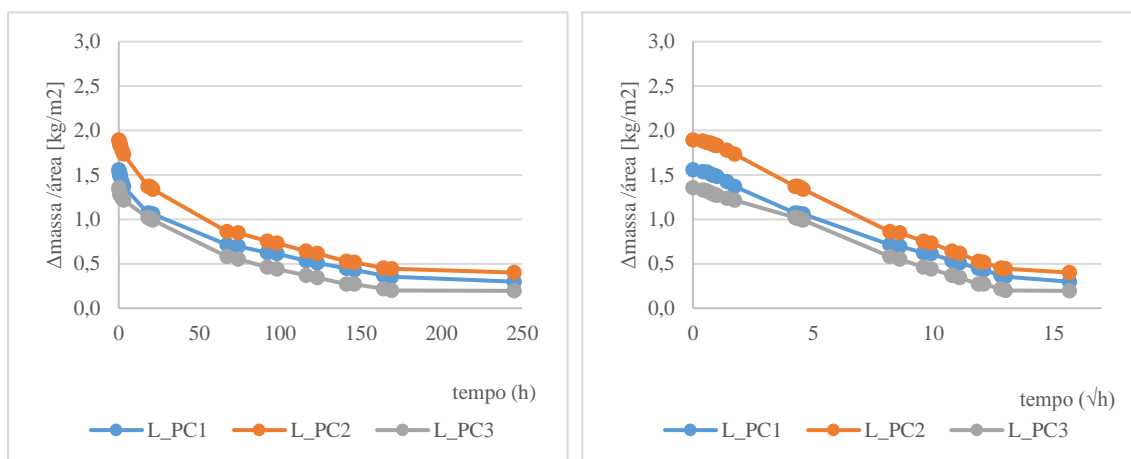


Figura A. 19 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes L_PC1, L_PC2 e L_PC3

Tabela A. 22 - Quantidades de água libertada pelos provetes L_PC4, L_PC5 e L_PC6

Datas	Tempo			Massas (g)			[(mi-m0)/A]		
	[minutos]	[horas]	[horas 1/2]	L_PC4	L_PC5	L_PC6	L_PC4	L_PC5	L_PC6
13-10-2017	0,0	0,0	0,00	157,26	151,55	150,28	1,79	1,78	1,24
	10,0	0,2	0,41	157,23	151,52	150,26	1,77	1,76	1,23
	20,0	0,3	0,58	157,21	151,49	150,24	1,76	1,74	1,22
	30,0	0,5	0,71	157,20	151,48	150,21	1,76	1,74	1,20
	40,0	0,7	0,82	157,19	151,46	150,19	1,75	1,73	1,19
	50,0	0,8	0,91	157,17	151,43	150,17	1,74	1,71	1,18
	60,0	1	1,00	157,15	151,42	150,16	1,73	1,71	1,17
	120,0	2	1,41	157,03	151,34	150,06	1,66	1,66	1,11
	180,0	3	1,73	156,98	151,28	150,01	1,63	1,63	1,09
	1080,0	18	4,24	156,39	150,63	149,60	1,31	1,27	0,86
	1140,0	19	4,36	156,37	150,59	149,57	1,30	1,25	0,84
	1200,0	20	4,47	156,36	150,57	149,56	1,30	1,24	0,84
	1260,0	21	4,58	156,35	150,54	149,56	1,29	1,22	0,84
	4020,0	67	8,19	155,48	149,53	148,76	0,81	0,67	0,39
3d	4440,0	74	8,60	155,44	149,47	148,71	0,79	0,63	0,36
4d	5520,0	92	9,59	155,25	149,26	148,56	0,69	0,52	0,28
	5880,0	98	9,90	155,22	149,21	148,53	0,67	0,49	0,26
5d	6960,0	116	10,77	155,03	149,03	148,41	0,57	0,39	0,20
	7380,0	123	11,09	154,99	148,99	148,39	0,55	0,37	0,18
6d	8460,0	141	11,87	154,83	148,87	148,30	0,46	0,30	0,13
	8760,0	146	12,08	154,80	148,85	148,30	0,44	0,29	0,13
7d	9840,0	164	12,81	154,69	148,79	148,27	0,38	0,26	0,12
	10140,0	169	13,00	154,65	148,76	148,25	0,36	0,24	0,11
10d	14700,0	245	15,65	154,59	148,81	148,31	0,33	0,27	0,14

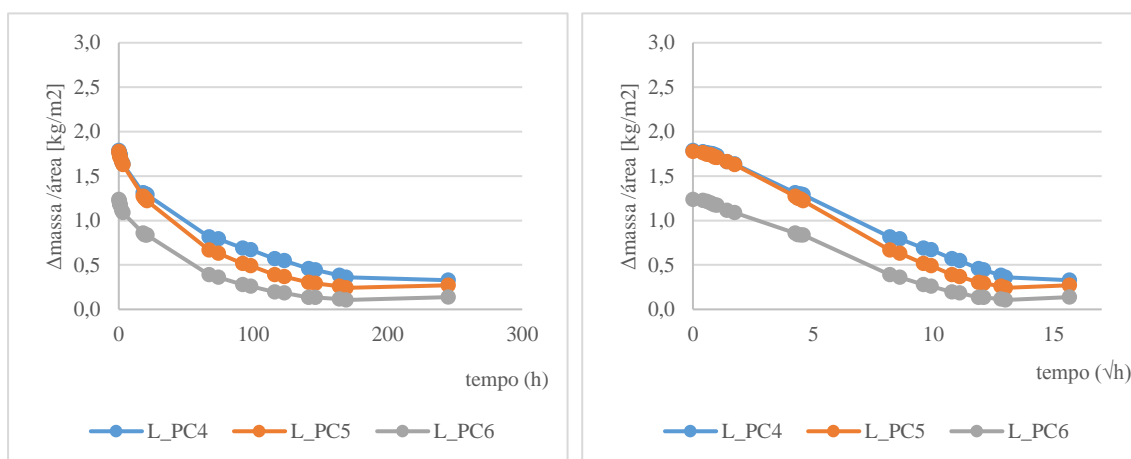


Figura A. 20 - Curvas de secagem em função do tempo e da raiz quadrado do tempo dos provetes L_PC4, L_PC5 e L_PC6

A.4 Velocidade de ultrassons

Tabela A. 23 – Velocidades de ultrassons dos provetes sem tratamento e consolidados

Origem	Tipo	Proвете	Altura (cubo)					Tempo (μs)				Velocidade	
			h1	h2	h3	h4	h _{médio} (mm)	t1	t2	t3	média	(m/s)	km/s
B	Natural	B_PN1	49,82	49,92	49,99	50,12	49,96	34,60	35,80	35,90	35,43	1410,04	1,41
	Consolidado	B_PC1	49,38	49,32	49,34	49,37	49,35	33,10	33,60	34,30	33,67	1465,92	1,47
E	Natural	E_PN1	50,69	50,44	50,54	50,63	50,58	36,80	36,80	37,80	37,13	1361,98	1,36
	Consolidado	E_PC1	50,85	50,93	50,64	50,81	50,81	35,60	36,60	36,40	36,20	1403,52	1,40
F	Natural	F_PN1	49,85	49,21	49,17	49,64	49,47	34,40	33,80	33,90	34,03	1453,50	1,45
		F_PN2	47,43	48,00	48,55	48,33	48,08	47,10	47,60	47,60	47,43	1013,58	1,01
	Consolidado	F_PC1	49,56	49,28	49,42	49,30	49,39	37,10	37,60	37,40	37,37	1321,77	1,32
		F_PC2	48,10	48,17	47,89	48,08	48,06	34,80	39,60	35,10	36,50	1316,71	1,32
I	Natural	I_PN1	50,46	50,63	50,92	51,13	50,79	52,10	51,90	48,10	50,70	1001,68	1,00
	Consolidado	I_PC1	48,25	48,33	48,50	48,41	48,37	35,60	36,10	36,10	35,93	1346,17	1,35
J	Natural	J_PN1	51,19	50,98	50,61	50,87	50,91	65,90	66,30	67,60	66,60	764,45	0,76
	Consolidado	J_PC1	51,65	51,87	51,65	51,91	51,77	43,10	41,90	42,10	42,37	1221,95	1,22
K	Natural	K_PN1	51,84	51,63	50,98	50,65	51,28	45,60	45,10	49,10	46,60	1100,32	1,10
		K_PN2	50,38	50,10	50,39	50,49	50,34	33,10	32,90	32,30	32,77	1536,32	1,54
		K_PN3	48,55	48,61	49,37	48,97	48,88	46,10	37,90	45,40	43,13	1133,11	1,13
	Consolidado	K_PC1	49,70	49,71	49,59	49,44	49,61	37,60	38,10	37,60	37,77	1313,59	1,31
		K_PC2	49,11	48,78	48,86	48,85	48,90	34,80	35,30	34,60	34,90	1401,15	1,40
		K_PC3	49,11	48,84	49,11	48,82	48,97	32,60	32,60	32,40	32,53	1505,23	1,51
L	Natural	L_PN1	51,31	50,86	50,69	51,27	51,03	52,80	55,80	49,80	52,80	966,52	0,97
		L_PN2	50,80	51,16	50,85	50,72	50,88	65,90	66,10	66,10	66,03	770,56	0,77
		L_PN3	50,67	49,54	49,71	49,91	49,96	42,80	46,30	46,10	45,07	1108,52	1,11
		L_PN4	51,74	51,12	50,32	51,47	51,16	53,10	52,80	52,60	52,83	968,38	0,97
		L_PN5	49,68	49,57	49,53	49,50	49,57	63,60	63,10	63,10	63,27	783,51	0,78
		L_PN6	47,96	48,74	49,71	49,29	48,93	50,30	50,10	50,10	50,17	975,25	0,98
	Consolidado	L_PC1	48,64	48,68	48,68	48,70	48,68	43,60	43,40	43,10	43,37	1122,41	1,12
		L_PC2	49,31	49,25	49,03	49,34	49,23	47,60	47,40	47,60	47,53	1035,75	1,04
		L_PC3	50,81	51,14	50,66	51,04	50,91	34,10	34,10	34,10	34,10	1493,04	1,49
		L_PC4	50,40	50,50	50,55	50,63	50,52	36,80	36,10	36,60	36,50	1384,11	1,38
		L_PC5	50,44	50,10	50,42	50,03	50,25	34,90	35,30	35,40	35,20	1427,49	1,43
		L_PC6	48,09	47,90	48,11	48,07	48,04	32,80	33,80	33,30	33,30	1442,72	1,44

Anexo II

Neste anexo está apresentado o resumo de um artigo já aceite pela Comissão Organizadora da Construção 2018, elaborado no âmbito da presente dissertação.

Resumo submetido para o Congresso ‘Construção 2018 – reabilitar e construir de forma sustentável’ a realizar-se de 21 a 23 de novembro de 2018

Palavras-chave: Forte costeiro, arenito, propriedades físicas e mecânicas, consolidação, silicatos de etilo, TEOS

Resumo. *A aplicação de consolidantes em pedra natural utilizada em construções antigas permite a recuperação da sua coesão interna. Na verdade, e segundo alguns autores, este processo tem possibilitado não só restituir as condições que outrora o material já tivera, como ainda aumentar significativamente as suas características mecânicas originais. Nesta comunicação descrevem-se os trabalhos de campo e laboratório necessários à caracterização de um arenito natural muito poroso utilizado na construção de um forte costeiro com mais de trezentos anos. Este está classificado de Imóvel de Interesse Público e, dada a sua localização num ambiente particularmente agressivo, tem sido sujeito a contínua degradação. No decorrer das últimas décadas o forte sofreu diversas intervenções de reabilitação, algumas das quais revelaram-se pouco apropriadas do ponto de vista estético, nomeadamente as que incluíram substituição de elementos estruturais de material lítico diferente tanto em termos visuais como físico-mecânicos. Um número considerado representativo de provetes foi obtido de amostras recolhidas de estruturas anexas ao forte, tendo uma parte sido sujeita a um processo de consolidação recorrendo a um silicato de etilo comercial. Todos os provetes foram submetidos a ensaios físicos e mecânicos com o objetivo de verificar a ação do consolidante utilizado no reforço. Por fim, os trabalhos realizados permitiram evidenciar a eficácia do tratamento de consolidação no reforço da resistência mecânica do arenito.*